

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY KARLOVY V PRAZE

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Železniční tunel Praha - Beroun jako příklad podzemní stavby  
v rizikovém krasovém prostředí

Railroad tunnel Praha – Beroun as an exmple of underground  
structure in challenging karstic areas



**Belokopytov Daniil**

**Školitel Ing. Josef Rott**

**Praha 2016**

Děkuji svému školiteli Ing. Josefu Rottovi za trpělivost a řadu cenných odborných konzultací, které mi v průběhu vypracování práce poskytl. Zároveň bych chtěl poděkovat Karolíně Hladíkové, představující pro mě oporu v nejvypjatějších okamžicích při dodělávání práce.

Čestně prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval sám s využitím citované literatury a cenných rad svého školitele.

V Praze dne 31.8.2016

Belokopytov Daniil

## **Abstract**

Následující práce se zabývá impozantním projektem tunelu mezi Prahou a Berounem. S délkou téměř 25 km se na trase tunelu vyskytuje množství rizik, jež jsou skutečnou výzvou pro tunelové stavitelství.

Tato práce se zaměřuje na specifika průchodu stavby územím budovaným krasovými horninami, jež obecně představuje jedno z nejrizikovějších území nejen pro tunelové stavitelství. Soustředí se na popis geologie Českého krasu a krasových jevů, které se ve studovaném území mohou vyskytovat. Usiluje o vymezení rizik a navržení způsobu jejich optimální predikce a překonání.

Součástí práce je i stručný úvod do tunelovacích technologií, použitelných pro výstavbu tunelu, a diskuse nad vhodností použití té které konkrétní technologie.

## **Abstract**

This paper discusses impressive project of the tunnel between Prague and Beroun. The length of the structure, spreading up to 25 km, leads to need of overcoming many risks, which may the tunnel encounter.

The text is focused on specific issues typical for areas built by karstic rocks, which generally present one of the most dangerous environment for building architectural projects of any kind. It concentrates on description of Bohemian karst and karstic features, which are likely to appear in studied area. It strives for delimitation of risks and suggestion of proper investigation and remediation methods, suitable for given project.

A part of the paper is a brief introduction into main tunneling technology, applicable for tunneling construction and discussion of possibilities of particular tunneling method.

## OBSAH

1. Úvod do problematiky: motivace a historie projektu .....	4
1.1 Motivace projektu .....	4
1.2 Vývoj pohledu na modernizaci .....	4
1.3.1 Vývoj trasování trati .....	5
2. Geologická a litologická charakteristika území .....	7
2.1 Geologie regionální – pražská pánev .....	7
2.2 Stručná litologická charakteristika jednotlivých souvrství zasažených stavbou .....	7
2.2.1 ORDOVIK.....	7
2.2.2 SILUR .....	8
2.2.3 DEVON .....	8
2.2.4 KŘÍDA.....	10
2.3 Úvod, obecné údaje, vznik krasu – typy krasování .....	10
2.3.1 OBECNÉ ÚDAJE .....	10
2.3.2 HYDROGEOLOGIE KRASU .....	10
2.3.3 VZNIK KRASOVÝCH JEVŮ .....	11
2.3.4 Vybrané jeskyně S od řeky Berounky .....	12
2.3.4.1 Amerika I a II.....	12
2.3.4.2 Arnoldka, Čerínka.....	12
2.3.4.3 Únorová propast .....	13
2.3.4.4 Arnika .....	13
2.3.4.6 Deprese na Dívčích hradech.....	13
3. Současný stav projektové přípravy.....	15
3.1 Trasa trati .....	15
3.2 Stavební koncepce trati .....	15
4. Možné metody ražby.....	16
4.1 Nová rakouská tunelovací metoda .....	16
4.2 Plnoprofilové razící stroje (TBM) .....	18
4.3 NRTM/TBM porovnání, vhodnost pro úsek Hlubočepy-rozplet.....	20
5. Vymezení rizik, průzkum a sanace.....	22
5.1 Vymezení rizik.....	22
5.2 Možnosti průzkumu .....	23
5.3 Sanace .....	24
5.4 Některá specifika tunelování v krasu.....	25
6. Závěr .....	27

7. Seznam použité literatury .....	28
8. Přílohy	

## **1. Úvod do problematiky: motivace a historie projektu**

### **1.1 Motivace projektu**

Nové železniční spojení Praha – Beroun je velkolepý projekt z řady hledisek. Vyznačuje se (pro Českou republiku nebyvalým) rozsahem jak materiálním tak i technickým. Existuje řada důvodů, proč usilovat o realizaci takového projektu. Především, ČR se stane důstojnou částí budované panevropské železniční sítě a kvalitní infrastruktura je podmínkou hospodářského rozvoje. Zvýší se komfort i rychlost, se kterou bude možné cestovat a dopravovat náklad v rámci republiky, přičemž větší atraktivita a tudíž i využití železnice bude mít pozitivní vliv na ekologii – železniční doprava má řádově nižší emise CO<sub>2</sub> na cestujícího/km oproti silniční dopravě, stejně jako výrazně menší zábor plochy. Nově vybudovaný úsek také výrazně odlehčí stávající trati do Berouna, což opět sníží ekologickou zátěž v údolí Berounky, kde současná trať leží (a která mj. prochází přes CHKO Český kras) a zároveň umožní větší komfort a rozsah lokální železniční dopravy. Konečně, realizace takového projektu je vždy výbornou možností rozvoje a uplatnění nových technologií, stejně jako otázkou prestiže státu, v němž se realizuje.

Tato práce si klade za cíl dát do souvislosti stavbu tunelu a krasové území, jímž bude zčásti procházet. Shrnuje hlavní poznatky o geologii a hydrogeologii Českého krasu, snaží se vymezit některá možná rizika tunelování v krasových oblastech a nastínit jejich možná překonání v rámci známých a používaných tunelovacích metod. Zároveň je výchozí rešeršní prací pro optimalizační proces, kterému bude dílčí úsek tunelu podroben v rámci diplomové práce.

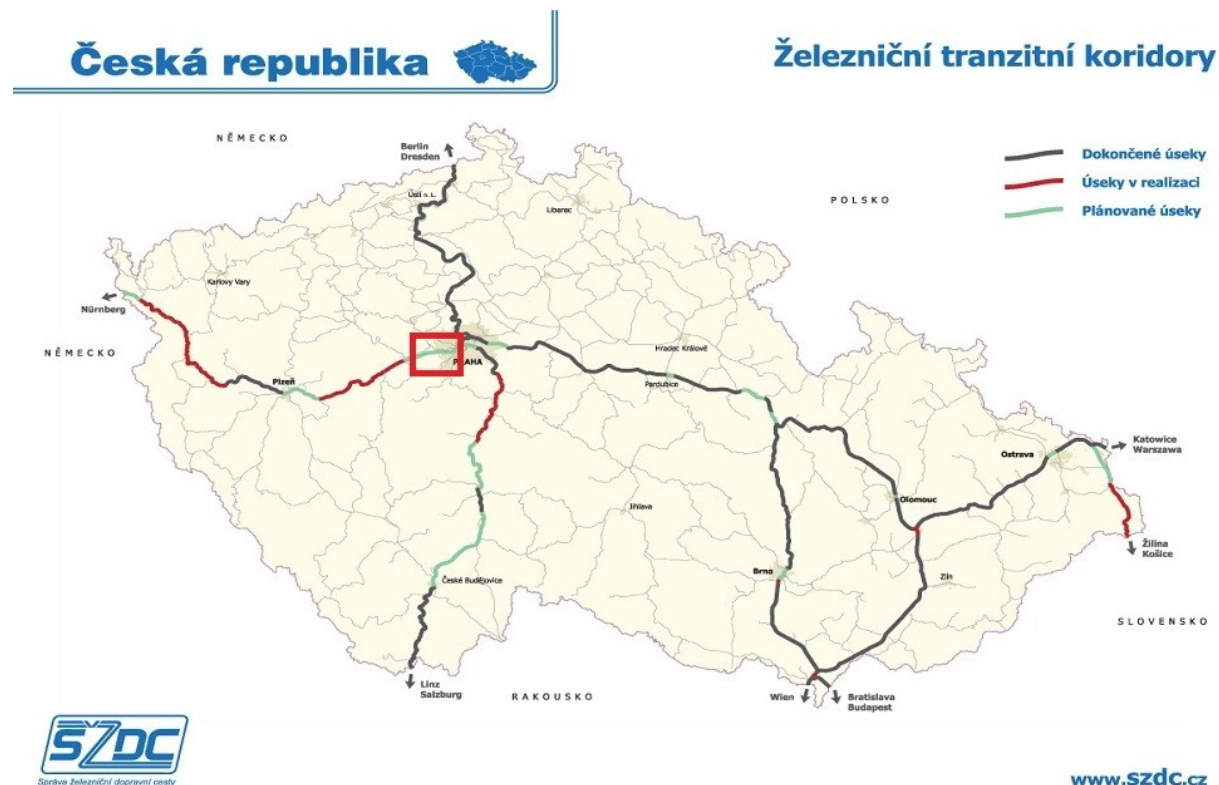
Následující text je členěn do pěti kapitol: první z nich uvádí čtenáře do problematiky shrnutím dosavadního vývoje projektu. Druhá kapitola stručně pojednává o regionálně-geologickém vývoji a jednotlivých litologiích v trase tunelu. Jsou zde rovněž soustředěny poznatky o geologii, hydrogeologii a o některých krasových jevech Českého krasu. Ve třetí kapitole je přehledně uveden současný stav projektové přípravy stavby, čtvrtá pak rozvádí aplikovatelné tunelovací technologie – NRTM i plnoprofilové razící štíty (zjednodušeně TBM). Pátá kapitola se zaměřuje na rizika spojená s tunelováním v krasu, průzkum za účelem jejich odhalení i případné sanace. Závěrečná šestá kapitola shrnuje získané poznatky a vytyčuje cíle navazující diplomové práce.

### **1.2 Vývoj pohledu na modernizaci**

Základním podnětem pro projekt železničního tunelu Praha – Beroun bylo usnesení vlády č.885 ze dne 13.7.2005 (KRSEK, 2007) které stanovilo mj. modernizaci III. transnitního železničního koridoru (TŽK), na jehož úseku leží trať Praha - Beroun, jako prioritní projekt evropského zájmu. Celý TŽK III. je pak součástí severní větve Rýnsko – Dunajského mezinárodního panevropského koridoru číslo IX (Rhine-Danube Core Network Corridor, 2015), jehož koncovými body jsou Norimberk/Mnichov a hranice Slovenska a Ukrajiny (posledním uzlovým bodem v EU je Žilina). O významu trati svědčí i fakt, že je koncipována jako součást budoucí vysokorychlostní tratě (VRT) s maximální rychlostí 300 km/h (KRSEK, 2007 b,c, KRÁSA et al., 2007).

Rozhodnutí vést trať podzemním tunelem bylo přijato po zpracování studie (KRSEK, 2007 b,c, KRÁSA et al., 2007), podle níž stávající dvoukolejná trať, vedoucí údolím řeky Berounky nevyhovuje požadavkům pro TŽK; mezi ně patří například cestovní rychlost 160 km/h (Tranzitní železniční koridory, 2006), nedosažitelná kvůli častým zatáčkám a problematická i z hlediska

hustého osídlení území, jímž trať prochází. (V současné době se soupravy mohou pohybovat rychlostí nejvýše 100 km/h na čtyřech oddělených úsecích, tvořících dohromady méně než polovinu délky tratě.) (BONEV, 2006) Navíc jsou případné úpravy tratě limitovány hygienicko-ochranářskými zájmy, jelikož významná část stavby leží v CHKO Český kras, vč. NPR Karlštejnsko (KRSEK, 2007 b,c, KRÁSA et al., 2007). Efektivní modernizace je tedy v současném trasování prakticky nemožná.



Obr. 1: Vyznačení TŽK v rámci České republiky. Podle (Tranzitní železniční koridory, 2006)

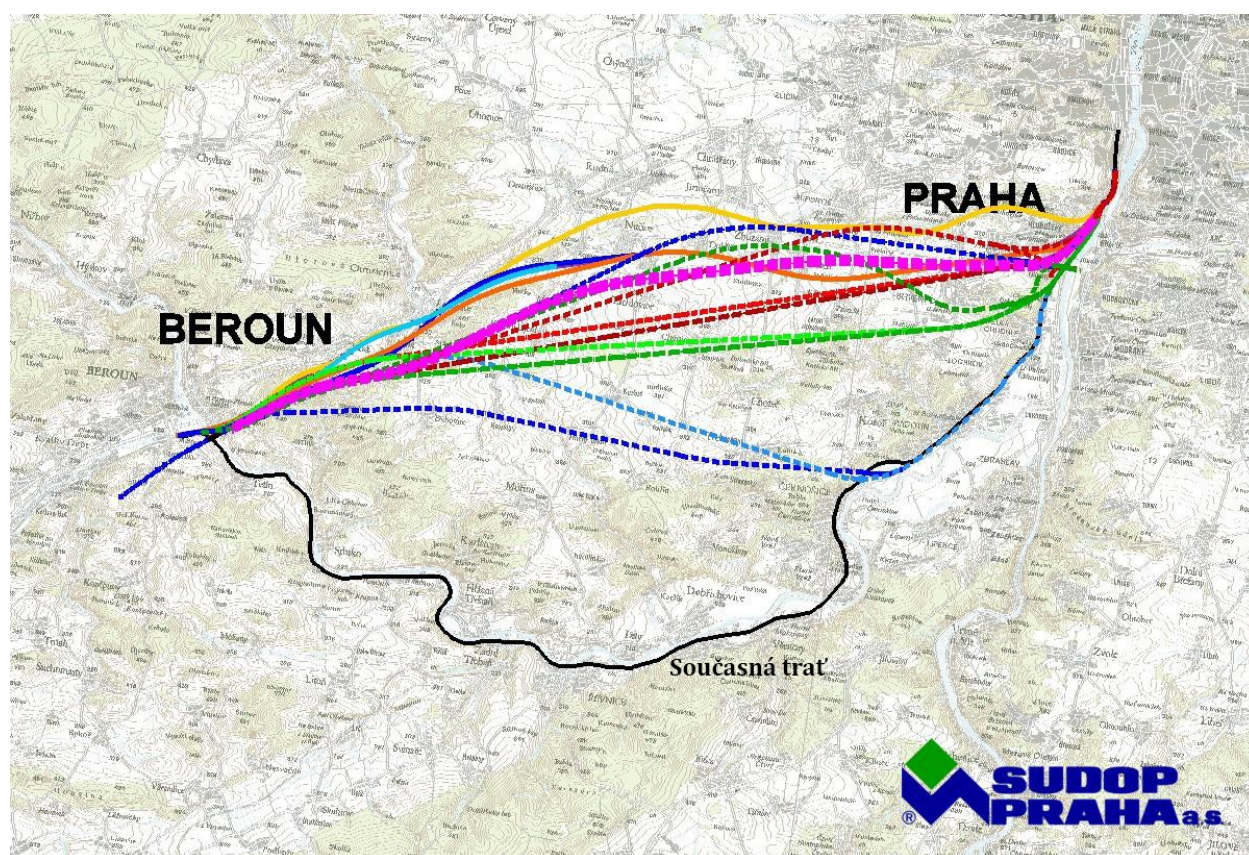
### 1.3.1 Vývoj trasování trati

Zpočátku byly uvažované tři možné varianty vedení trasy; varianta první, jenž vedla obloukem jižně od dálnice D5 byla zamítnuta kvůli značnému kolísání výškového vedení trasy. Druhá a třetí varianta jsou si blízké v některých parametrech, např. počítaly s vedením trasy podzemními tunely s malými sklony a přemostěním toku Loděnice mostem (432 m pro druhou a 200 m pro třetí variantu). Třetí, nejkratší varianta byla posléze zamítnuta, jelikož překlenutí Loděnice by probíhalo v CHKO Český kras, což nebylo povoleno správou CHKO. (RŮŽIČKA, HASÍK, 2007)

Při následném jednání se starostou obce Sv. Jan pod Skalou, jejímž územím měla trať procházet, bylo odmítnuto vedení trasy obcí dle varianty 2, což vedlo k návratu k 3. variantě vedení trasy upravené pro překonání říčky nikoliv mostem, ale mělkým vedeným tunelem. Následně byly obě varianty, jak č. 2 tak i upravená č. 3 souhrnně označeny jako trasa červená. Ta byla posléze doplněna o variantu zelenou, která počítala se zaústěním tunelu do pražského uzlu již v Chuchli, čímž by došlo k celkovému zkrácení tunelů, a byla obdobně jako červená varianta rozdělena na verzi podcházející Loděnici tunelem a verzi s mostem. (RŮŽIČKA, HASÍK, 2007) Následné kategorické odmítnutí starosty jakéhokoliv průchodu trati katastrálním územím Sv. Jana pod Skalou (KRSEK, 2007c) spolu s výsledkem následné IG studie dalo vzniknout další, fialové modifikaci, která byla sice o 420 m delší než upravená varianta č. 3 (tunelová verze červené), tj. 27,978 m oproti 27,558 m, vyhýbala se však území tvořenému karbonáty s předpokládaným hojným výskytem paleokrasových jevů, což by znamenalo zrychlení postupu ražby zároveň se zvýšením bezpečnosti.



(RŮŽIČKA, HASÍK, 2007) Tato práce (pokud vysloveně nebude uvedeno jinak) se tedy bude zabývat konečným, fialovým vedením trati.



Obr. 2: Varianty trati. V textu rozebrány jsou pouze varianty červená, zelená a konečná fialová; ostatní byly zamítnuty v dřívějších etapách přípravy. Převzato z (Informace o stavbě, 2008)

### 1.3.2 Vývoj stavebního řešení projektu

Stavební technologická část projektu byla od počátku poměrně jednotná. Vzhledem ke značné délce navrhovaných tunelů počítal projekt od počátku s využitím TBM jako hlavního prostředku k ražbě, s možným využitím NRTM pro část mezi pražskými portály Chuchle a Hlubočepy až k místu větvení na tyto odbočky. Jednotný byl rovněž pohled na příčné uspořádání tunelů – požadavek vysokých rychlostí (až 300 km/h) stanovil nutnost dvou oddělených dvoukolejných tunelů. (KRSEK, 2007b, RŮŽIČKA, HASÍK, 2007)

Návrhy na samotnou realizaci (etapizaci) se lišily – vývojově nejstarší varianta předpokládala vyražení jednoho tunelu a únikové štoly, která se ve druhé etapě měla přestrojit na druhý tunel. (RŮŽIČKA, HASÍK, 2007) Obdobnou, ale finančně i časově náročnější možností bylo vyražení tunelu a štoly v první etapě, přičemž dalším postupem mělo být vyražení druhého tunelu s ponecháním štoly mezi tunely. Další možností bylo vyražení obou tunelů souběžně, přičemž by byly oba rovnou vystrojeny (tj. výstavba bez etapizace), popř. by v první fázi byl vystrojen jen jeden tunel a druhý by se ponechal jako únikový. Vzhledem k nejnižším materiálním i časovým nárokům (28,1 mld. Kč, 8,75 roku; pro tzv. švýcarský profil – viz dále) byla dána přednost projektu se dvěma tunely raženými současně (KRSEK, 2007b).

Dalším předmětem diskuzí byl profil tunelu – rozebíraly se dvě možnosti: velkorysý profil dle standardů německých drah se světelným průměrem 9,4 m a úsporný švýcarský profil s průměrem 8,3 m. Přes zjevné ekonomické výhody menšího profilu byl v počátcích odmítnut, jelikož neumožňoval použití trakčního vedení shodného s typem, používaným na většině ostatních tratí Správy železniční dopravní cesty a vyžadující průměr tunelu minimálně 8,6m. Následná jednání, mj.

i se švýcarským dodavatelem trakčního vedení ovšem prokázala, že průměr 8,3 m je dostačující. (KRSEK, 2007b)

## **2. Geologická a litologická charakteristika území**

### **2.1 Geologie regionální – pražská pánev**

Z regionálně-geologického hlediska se celá stavba nachází v paleozoiku Barrandienu, konkrétně v pražské pánvi. Ta je tvořena lineární depresí riftového charakteru založenou počátku ordoviku, s delší osou směru 65°, rozkládající se přibližně mezi Plzní a sahající k SV okraji Prahy. Výplň této pánve spočívá na zvrásněném proterozoickém podkladu a tvoří úplný sled převážně marinních sedimentů od spodního ordoviku po střední devon. Sedimentace byla doprovázena synsedimentárními deformacemi a vulkanickou činností zejména během ordoviku (vyznívá na přelomu království/kosovu) a spodního siluru. Charakteristickým rysem pánve je také její členění na množství segmentů o různé subsidenci a tudíž i mocnosti sedimentů (CLUPÁČ, 1992, 2002).

Variská orogeneze, jejíž počátek je v oblasti indikován tzv. kačáckým dějem detailně provrášnila sedimentární sekvenci pražské pánve; spolu s pozdější tektonikou se podílela na vzniku řady příčných i podélných zlomů a přesmyků. (CHÁB, 2008) Ty pak do značné míry předurčily krasový vývoj oblasti (viz dále).

### **2.2 Stručná litologická charakteristika jednotlivých souvrství zasažených stavbou**

Následující přehled hlavních litotypů je řazen chronologicky od hornin nejstarší po horniny nejmladší. Popisuje vývoj litologie, charakteristické znaky, počet úseků (oddělených jinými litologiemi) a jejich celkovou délku. Zároveň je každému litotypu přiřazena příslušná geotechnická klasifikace, tj. geotechnice typ (dále v textu zkracováno na G-typ) (GeoTec GS, 2007). Přehled G-typů se základními geotechnickými parametry je předmětem přílohy č. 1 této práce.

Geologický profil trasy se nachází v příloze č. 1 této práce.

Tabulka geotechnických typů se nachází v příloze č. 2 této práce.

#### **2.2.1 ORDOVIK**

Bohdalecké souvrství, nejnižší člen ordoviku zasažený stavbou, se v nivelitě tunelu se vyskytuje jen v jednom úseku o délce cca 320 m. Je tvořeno zejména jílovitými břidlicemi a odlučnými, lupenitými prachovci, častou příměsí je pyrit, jehož větráváním vznikají síranové povlaky a krystaly sádrovce velikosti až 10 cm. (CHLUPÁČ, 1992, 2002) Z geotechnického hlediska spadá do G-typu 3. (GeoTec GS, 2007)

Královčovské souvrství je tvořeno velmi jemnozrnnými, šedozelenými až šedými jílovými břidlicemi (CHLUPÁČ, 2002) až jílovci (s příměsí křemenného siltu). Nejvyšší části souvrství tvoří prachovité břidlice (CHLUPÁČ, 1992), dokládající počátek globálního ordovického ochlazení (CHLUPÁČ, 1992). Ve staničení tunelu tvoří dva úseky o celkové délce 3,33 km, zařazuje se do G-typu 2. (GeoTec GS, 2007)

Během ukládání následujících vrstev kosovu došlo k výraznému ochlazení a poklesu hladiny. To se odrazilo na charakteru ukládaných sedimentů: bázi kosovu tvoří dvě polohy hrubozrnných drob, přecházející do slepencovitých pískovce, oddělených od sebe vložkou prachovitých až písčitých břidlic. Střední část sledu je tvořena rytmicky se střídajícími šedozelenými drobami, břidlicemi a křemennými pískovci; ve vyšších částech souvrství se pak nachází pískovce, přecházející až do slepenců. (CHLUPÁČ, 1992) Stavba má procházet 6 úseky o celkové délce 2,33 km. Faciální pestrost je důvodem, proč se řadí do G-typů 2,4 a 7. (GeoTec GS, 2007)



### 2.2.2 SILUR

Spodní, tzv. břidličný silur je tvořen liteňskou skupinou, které se dále dělí na tři souvrství: želkovické, tvořené tmavými graptolitovými břidlicemi, ukládanými po eustatickém zdvihu hladiny na začátku siluru; lithlavské souvrství s šedozelenými vápnitými jílovci až jílovitými vápenci, které se postupně střídají s jílovitými břidlicemi (CHLUPÁČ, 1992) a v nichž lze nalézt tufitické vložky (CHLUPÁČ, 2002); motolské souvrství s černými vápnitými břidlicemi (CHLUPÁČ, 1992) a častými tufitickými vložkami (CHLUPÁČ, 2002). Geotechnická charakteristika všech souvrství je obdobná, řadí se do G-typu 7. Tvoří velkou část profilu trasy o úhrnné délce 4,09 km rozdělené do 18 úseků. (GeoTec GS, 2007)

Současně s ukládáním liteňské skupiny probíhala intenzivní vulkanická činnost, soustředěná do vulkanických center mezi Berounem a Prahou, mimo jiné i do okolí Sv. Jana pod Skalou. Produkovala zejména velká množství pyroklastik – tufitů a tufitických břidlic, v liteňské skupině nejrozšířenějších v motolském souvrství. (CHLUPÁČ, 2002) Souhrnně tyto vrstvy označujeme jako tufitickou facii liteňského souvrství; tvoří 5 úseků v širším okolí Sv. Jana pod Skalou o celkové délce 2,19 km a řadí se pod G-typ 8. (GeoTec GS, 2007)

Vápnitá facie liteňského souvrství se vyskytuje se v podobě vápnitých břidlic a představuje přechod mezi facií vulkanicko-karbonátovou a graptolitickými břidlicemi. (CHLUPÁČ, 2002) Tvoří malou část nadloží v okolí Sv. Jana, v nivelitě tunelu se nevyskytují. (GeoTec GS, 2007)

Souvrství kopaninské se vyznačuje dvojitou povahou: v okolí vulkanických center vykazuje velkou faciální pestrost, zatímco v částech s břidličnatou sedimentací se vyvíjelo jednotvárně. (CHLUPÁČ, 1992) Od podloží vývoj obdobný motolskému souvrství přechází do vápnitých břidlic s tufitickou příměsí. V okolí vulkanických center se spolu s pyroklastikami ukládaly i bioklastické vápence. V nejsvrchnější části kopaninského souvrství byla ukončena vulkanická činnost a začaly se usazovat biogenní šedé vápence, v jejichž rámci se vyvinuly i slavné vápence „ortocerové“ (CHLUPÁČ, 2002). Rozsah zasažený tunelem je malý – 0,45 km ve 4 úsecích. Faciální vývoj je příčinou zařazení do G-typů č. 7,6,5 od podloží do nadloží. (GeoTec GS, 2007)

Obdobně jako tufitická facie liteňského souvrství, odráží i tufitická facie kopaninského souvrství silurskou vulkanickou činnost, s rozsahem do spodní části kopaninského souvrství. Je tvořena opět tufy (které měly všeobecně v siluru převahu nad samotnými výlevy). (CHLUPÁČ, 2002) Stejně jako tufy liteňské, řadí se do G-typu 8. V profilu tvoří jediný, 0,11 km dlouhý úsek. (GeoTec GS, 2007)

Nejvyšší silur představuje přídolské souvrství, charakteristické nástupem deskovitých biomikritických až biotritických vápenců, proložených vápnitými břidlicemi. V SZ části pánve na ně nasedají světle šedé krinoidové vápence. (CHLUPÁČ, 2002) V profilu je nalezneme ve 3 úsecích o celkové délce 0,34 km, spadají do G-typu 6. (GeoTec GS, 2007)

Jak již bylo uvedeno, vulkanismus byl charakteristickým rysem silurského vývoje, s nejvýraznější aktivitou mezi bází motolských vrstev a spodní částí kopaninského souvrství, což odpovídá rozsahu wenlock – ludlow. Vulkanismus je důsledkem extenze, v níž se Pražská pánev nacházela během ordoviku a siluru a má vnitrodeskový, bazický charakter. Vyznačuje se řadou hypabysálních těles, pronikajících do okolních břidlic až několik desítek metrů mocnými tělesy. (CHLUPÁČ, 2002) Dohromady intruzivní i efuzivní bazalty tvoří v profilu 20 poloh o celkové délce 4,43 km. Řadí se do G-typu 1. (GeoTec GS, 2007)

### 2.2.3 DEVON

Devonský vývoj začíná lochkovským souvrstvím, které je tvořeno dvěma hlavními faciemi, vápenci kotýskými a radotínskými, oddělenými od sebe několika přechodnými faciemi. Radotínské vápence jsou deskovité, spíše hlubokovodnější, s rytmickými vložkami tmavých, vápnitých břidlic, které tvoří pozvolné přechody, a polohami rohovců. Kotýské vápence jsou charakteristické vysokým podílem

CaCO<sub>3</sub> (79-96%), rohovce jsou hojné, jednotlivé vrstvy jsou oddělovány velmi tenkými laminami vápnatých jílovců. Tvořily se v mělkém prostředí, na místech původních silurských elevací. Přechodné facie (označována jako kosořská) je tvořena biodetritickými vápenci s menším obsahem břidličné složky oproti vápencům radotínským. (CHLUPÁČ, 1992, 2002) V trase tunelu se vyskytují ve 4 úsecích o celkové délce 0,6 km. G-typ se směrem do nadloží mění z 5 na 6. (GeoTec GS, 2007)

Souvrství pražské je faciálně nejrozmanitější jednotkou devonu pražské pánve. Dvorecko-prokopské vápence jsou typicky mikritové, vzácněji biomikritové, hlíznaté nebo hladce deskovité, s obsahem CaCO<sub>3</sub> 72-91%. Hladce deskovitý typ často obsahuje vložky laminovaných vápnatých břidlic; výskyty rohovců leží spíše ve vyšších partiích jednotky.

Řeporyjské vápence jsou většinou hlíznaté, mikritové až biomikritové, bez souvislých jílových vložek, které se hromadí v hmotě mezi jednotlivými hlíznami. Chemické složení je blízké dvorecko-prokopským vápencům, rohovce se v nevyskytují.

Loděnické vápence tvoří deskovitá tělesa s tenkými vložkami vápnatých břidlic. Charakteristickým znakem je pestré skvrnitě zbarvení. Rohovce opět chybí, chemismus vykazuje obecně vyšší podíl CaCO<sub>3</sub> oproti vápencům řeporyjským. Tvoří řehodný člen mezi vápenci řeporyjskými a sliveneckými.

Pražské, řeporyjské i loděnické vápence vytváří pozvolné vzájemné laterální horizontální přechody (CHLUPÁČ, 1992); proto se posuzují jako jeden celek, řadí se do G-typu 5. Vyskytují se ve 4 úsecích o souhrnné délce 1,9 km.

Ryze mělkovodní vývoj představují hrubě vrstevnaté vápence slivenecké, tvořené krinodovým biodetritem. Významný je vysoký podíl CaCO<sub>3</sub>, v rozmezí 90-98%. Tvoří výraznější přechod s řeporyjskými nebo loděnickými vápenci, do koněpruských vápenců přecházejí pozvolna. Ty pak tvoří nepravidelně rozšířené, bělavé až světle šedé nezvrstvené biodetritické sledy s nejvyšším obsahem CaCO<sub>3</sub> – 97-98%. Přechází do vinařických vápenců, přechodové facie mezi útesovými koněpruskými vápenci a okolními mikritickým vápenci loděnickými, nejdále od útesu pak dvorecko-prokopskými. (CHLUPÁČ, 1992, 2002) Zahrnují se pod G-typ 5, v profilu přítomny ve dvou úsecích o úhrnné délce 0,19 km. (GeoTec GS, 2007)

Oproti podložnímu pražskému vykazuje zlíčovské souvrství větší stálost. Celý sled je většinou tvořen tmavě šedými biodetritickými a mikritickými vápenci, přítomny jsou tmavé rohovce. Ve spodní části souvrství (v oblasti mezi Klukovicemi, Velkou Chuchlí, Chotčí a Kosoří) se vyskytuje značné množství biodetritického materiálu (korálový obzor), který směrem na Z přechází do mikritových vápenců. Ve vyšších částech souvrství pak postupně přibývá břidličných složek, které pak zcela převládá v nadložním dalejsko-třebotovském souvrství. (CHLUPÁČ, 1992., 2002) Zlíčovské horniny najdeme ve 4 úsecích o celkové délce 0,84 km, přiřazené pod G-typ 5. (GeoTec GS, 2007)

Dalejské souvrství nepředstavuje samostatnou stratigrafickou jednotku řádu souvrství tvoří spolu s nadložím třebotovským souvrstvím. Dalejské vápnaté břidlice tvoří rytmy světlejších a tmavších poloh o mocnosti 10-30 cm, obsahující konkréce mikritových vápenců; celkově však podíl nerozpustné složky přesahuje 66%. Nejsou ostře ohraničeny, do podloží i nadloží přechází velmi volně. (CHLUPÁČ, 1992, 2002) Představují G-typ 7 ve 2 úsecích o celkové délce 0,19 km. (GeoTec GS, 2007)

Třebotovské vápence tvoří vrchní část dalejsko-třebotovského souvrství. Jsou typické svým načervenalým zbarvením a hlíznatou, mikritickou strukturou. Břidličnaté vložky hojné při bázi na kontaktu s podložními dalejskými břidlicemi směrem do nadloží vyznívají až na tenké zelenavé laminy. Celkově je zde vyšší podíl nerozpustných složek, kolem 30%. (CHLUPÁČ, 1992, 2002) Ve dvou úsecích zaujímají 0,26 km podélného profilu zařazeny pod G-typ 5.

Střední devon (eifel) začíná chotečským souvrstvím, které je blízké souvrství zlíčovskému. Převažují zde tmavě šedé biodetritické až (bio)mikritové vápence s rohovci, přičemž je dodržena pro celý devon typická zonalita se přibýváním mikritové části k sz. a jz. Lokálně jsou přítomny tenké vložky šedých až černošedých vápnatých břidlic. Chemické složení kolísá, v průměru obsahuje 83-98% CaCO<sub>3</sub>. (CHLUPÁČ, 1992) Řadí se pod G-typ 5. Délka 0,32 km je rozdělena do 3 úseků. (GeoTec GS, 2007)

Nástup nadložního srbského souvrství je dán globální geologickou událostí, tzv. kačáckým eventem – eustatickým zdvihem vodní hladiny a zaplavením šelfů chladnými vodami. Kačácké vrstvy, tmavě šedé tenké laminované vápnaté břidlice, podle nich byl event nazván, nasedají ostře na chotečské souvrství. Při bázi často obsahují vložky bitumózních vápenců, místy i s rohovci. Tvoří

však menší část souvrství – dominantním členem jsou nadložní roblínské vrstvy, náhle nasedající v době slídnatých prachovců. Výjimečným znakem roblínských vrstev je jejich flyšový vývoj: v nepravidelných, centimetrových až decimetrových intervalech se zde střídají zelenošedé laminované prachovce (jež ve vrstevním sledu převládají) s vložkami zelenošedých a šedých drobových pískovců. Celý sled pak může vykazovat gradační i proudové zvrstvení a je interpretován jako turbidity (CHLUPÁČ, 1992), spjaté s oživením tektonické aktivity. (CHLUPÁČ, 2002)

Vzhledem k rozdílu ve vývoji a litologii se spodní člen kosovského souvrství řadí do G-typu 7, roblínské vrstvy pak do smíšeného typu 2,4,7. Tunel prochází souvrstvím v jednom 2,5 km dlouhém úseku. (GeoTec GS, 2007)

## **2.2.4 KŘÍDA**

Křída je reprezentována perucko-korycanským souvrstvím. Vyskytuje se zejména v nadloží nebo jako výplň hlubokých krasových depresí, které mohou mít ojedinělý dosah až na úroveň tunelových trub; bylo dokumentováno vrtem J2 o hloubce 113,5 m, je rovněž znám i z jiných vrtů v oblasti (KLEIN, ZELENKA, 1991); u dna zastižen odvápněný vápenec, v nadloží perucko-korycanské souvrství (GeoTec GS, 2007). Tvoří je slepence při bázi, do nadloží přechází do pískovců s vložkami jílovců, v korycanském souvrství pak i do glaukonitických poloh. (CHLUPÁČ, 2002) Podrobnější popis těchto krasových depresí bude podán v kapitole 2.3.4. Náleží do G-typu 3. (GeoTec GS, 2007)

## **2.3 Úvod, obecné údaje, vznik krasu – typy krasování**

### **2.3.1 OBECNÉ ÚDAJE**

Jedním z hlavních rizik tunelování v Českém krasu je riziko zasažení krasových dutin. Snaha o minimalizaci tohoto rizika vedla sice k úpravě trasování tunelu (viz kapitola 1.3.1), avšak vyhnout se krasovým oblastem zcela nebylo možné. Tato kapitola proto stručně představuje Český kras s jeho specifickými rysy s důrazem na podzemní krasové jevy, jejich rozsah a náležitost k jednotlivým souvrstvím.

Český kras není typickým krasovým územím (ve smyslu klasické práce Das Karstphänomen, Jovan Cvijić, 1893). Kromě (pro kras netypického) velmi malého množství povrchových krasových jevů zde neexistují (a zřejmě nikdy ani neexistovaly) soustředěné krasové ponory, vytvářející průtočný jeskynní systém. (BRUTHANS, ZEMAN, 200),17,18]. Naopak, většina známých krasových dutin, tvořených velmi běžně nepravidelnými, labyrintovitými prostory v různých výškových úrovních je zčásti nebo zcela vyplněna sedimenty. (BRUTHANS, ZEMAN, 2001) Rozsah jeskynních prostor je evidován a od roku 2003 pravidelně zveřejňován (ŽÁK et al., 2003) v intervalu dvou let; podle poslední aktualizace je podchyceno 691 objektů o celkové délce 24 338 m. (ŽÁK et al., 2015)

### **2.3.2 HYDROGEOLOGIE KRASU**

Výskyt krasových jevů je úzce spjat s hydrogeologií oblasti. Ta je hodnocena mimo jiné délkou jeskynních chodeb\* a vydatností pramenů vázaných na jednotlivá souvrství, která lze přiřadit jednomu ze tří typů hydrogeologických těles.

Nadložní izolátor, tvořený od nadloží do podloží srbským souvrstvím, dalejskými břidlicemi a vápenci třebotovskými a chotečskými vykazuje maximální průměrnou vydatností pramenů v chotečských vápencích 0,3 l/s, u ostatních souvrství v řádech prvních setin (a méně) l/s. (BRUTHANS, ZEMAN, 2000) Podíl jeskynních chodeb je pouhých 0,16% a to pouze v chotečských vápencích v okolí Srbska. (BRUTHANS, ZEMAN, 2001)

Podložní izolátor tvoří silurské horniny; průměrné vydatnosti pramenů v přídolském souvrství se rovnají 0,6 l/s, v kopaninském a liteňském souvrství pak 0,2 l/s s výkyvy do 2 l/s. (BRUTHANS, ZEMAN, 2000) Krasové jevy jsou vyvinuty minimálně: v přídolí 0,6%,

v kopaninském souvrství 0,1% a v liteňském souvrství pouze lokálně ve facii Kozla v Šanově koutě 3,9% (BRUTHANS, ZEMAN, 2001)(patrně se jedná o lokální kolektor).

Mezi izolátory se nachází hlavní kolektor, tvořený zejména souvrstvím pražským, méně lochkovským a v omezené míře i zlíčovským (a místy i přídolským). Jeho mocnost se pohybuje v rozmezí 120-300 m (přičemž lochkov a prag dosahují mocnosti 120-200 m). Vydatnosti lochkovu a pragu se průměrně pohybují kolem 4 l/s, maximálně až 20 l/s, zlíčov poskytne odtok 2 l/s, maximálně 10 l/s. (BRUTHANS, ZEMAN, 2000) S vydatností koresponduje i míra zkrasování – 93% v lochkovu a pragu, 2,3% ve zlíchovu (zejm. v pražském okolí). (BRUTHANS, ZEMAN, 2001) Posloupnost vztahů je přitom následující: od litologie se odvíjí míra zkrasování, od které se odvíjí propustnost. Zajímavostí pak je, že míra zkrasování není vždy přímo úměrná čistotě vápenců – tak například, loďnické i lochkovské vápence (vč. kotýských, obsahujících rohovce) jsou na krasové jevy poměrně bohaté, zatímco čistší chotečské vápence téměř nekrasoví. (BRUTHANS, ZEMAN, 2000, 2001) Jedním z možných vysvětlení je menší mocnost posledně jmenovaných (nejvýše kolem 60 m (CHLUPÁČ, 1992)), popř. jejich odlišné reologické vlastnosti, která neumožňuje vznik dostatečného množství propojených puklinových systémů (o čemž svědčí i malé vydatnosti krasových pramenů v této facii (BRUTHANS, ZEMAN, 2000)), které jsou základním předpokladem pro infiltraci vody a vytváření krasu.

Uváděné hodnoty platí pro území S od Berounky. (BRUTHANS, ZEMAN, 2001)

\*Poznámka: Celkový součet jeskynních chodeb dává podle (BRUTHANS, ZEMAN, 2001) hodnotu 15020 m, což je o 9318 m méně, než kolik je evidováno v posledním soupisu (ŽÁK et al., 2015). Takový nárůst je zřejmě způsobem dílem novými objevy, dílem nesystematickou evidencí jeskyní do roku 2003. Vzhledem k litologické charakteristice dříve známých jeskyní i novým objevům (ať už rozšiřováním stávajících lokalit nebo objevem zcela nových), u kterých se i nadále nejčastěji opakuje příslušnost k pragu, vzácněji lochkovu, lze považovat Bruthansův výpočet za stále platný.

### 2.3.3 VZNIK KRASOVÝCH JEVŮ

Krasování v oblasti ČK lze zjednodušeně rozdělit do několika etap. Přinejmenším v koněpruské oblasti lze rozpoznat krasování již během devonu. Z období mezi karbonem a cenomanem nejsou známy žádné podpovrchové krasové jevy; zachovaly se jen nečetné stopy po přípovrchovém krasování a krasových sedimentech. (BOSÁK, 1996)

Následující vývojová etapa mezi paleogénem a spodním miocénem souvisí s erozí a odnosem křídových sedimentů. Průsak povrchových vod až k vápencovému podloží byl umožněn až po obnažení propustných cenomanských pískovců (BOSÁK, 1996), spolu s vytvořením dostatečného hydraulického gradientu (vyšší ‰ až ‰) zahlobením erozní báze (BRUTHANS, ZEMAN, 2001); nejintenzivnější krasování pak probíhalo od středního po svrchní paleocén. (BOSÁK, 1996)

Během miocénu dochází ke zpomalení krasování, způsobeného především morfologickými změnami – pokračujícím prohlubováním erozní báze, což vedlo k fosilizaci vyšších pater krasových dutin. Od vyššího středního miocénu tento proces trvá dodnes. (BOSÁK, 1996)

Samotná geneze krasových jevů probíhala vzhledem k jejich morfologii (labyrintovosti) ve vadózní zóně a řídila se především třemi hlavními mechanismy: nesoustředěnými ponory z povrchových toků, rapidní infiltrací z povrchového toku během povodní a infiltrací z nadložních křídových (a terciérních) uloženin. (BRUTHANS, ZEMAN, 2001)

Nesoustředěnými ponory se v současnosti ztrácí část vody z Bubovického potoka (2-4 l/s), což je řádově více než tvoří odtok ze srážek. Takto vsáknutá voda pak může mířit do jiného, níže položeného a i několik kilometrů vzdáleného toku (v případě Bubovického potoka do Loděnice). Krasování je pak vázáno na celou oblast proudění. Tímto způsobem zřejmě vznikly některé jeskyně v údolí Berounky. (BRUTHANS, ZEMAN, 2001)

Na aktivitu řeky je rovněž vázán vznik jeskyní rapidní infiltrací, k němuž dochází při zvýšeném vodním stavu během povodní. Velký hydraulický gradient způsobuje vhnání říční vody do puklin a existujících krasových systémů, které jsou tímto výrazně remodelovány. (BRUTHANS, ZEMAN, 2001) Mezi jeskyně takto vytvořené patří například Barrandova jeskyně, Patrová jeskyně (BRUTHANS, ZEMAN, 2001), Petzoldovy jeskyně. (MENGLER, 2011)

Třetí model vzniku jeskyní, dobře vysvětlující vznik jeskyní ve vyšších nadmořských výškách, je speleogeneze infiltrací z nadložní křídou. Povrchové toky se během paleogénu

zahluhovaly až do devonského (a silurského) podloží; vzniklý hydraulický gradient spolu se vsakem z nadloží způsoboval intenzivní proudění v kolektoru, tvořeném vápenci pragu a lochkovu (v menší míře i zlíčovu a přídolí), které bylo drénováno na erozní bázi i několik kilometrů vzdálené od zóny infiltrace. Nadložní sedimenty pak chránily systém před zanesením. Pokračující zahluhování řeky způsobila, že se výše položené dutiny dostaly mimo freatickou zónu, a po erozi a odnosu křídového pokryvu byly postupně zaplněny sedimenty. Příkladem takových útvarů jsou jeskyně Amerika I a II, Únorová propast, jeskyně v lomu Čerínka (Palachova propast, Arnoldka), jeskyně na Parapleti aj. (BRUTHANS, ZEMAN, 2001)

Méně běžným způsobem vzniku jeskyní je infiltrace z občasných ponorů. V současnosti je znám jediný systém tohoto druhu, datovaný do kvartérního období. Jedná se o jeskyni Arnika spojenou s vývěry ve Sv. Janu pod Skalou. Stopovací zkouškou bylo zjištěno, že rychlost proudění  $1,1 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  odpovídá rychlosti proudění v krasových kanálech. I přes ojedinělost tohoto úkazu není vyloučeno, že v minulosti takových kratších systémů bylo v Českém krasu více. (Bruthans, 2001)

### 2.3.4 Vybrané jeskyně S od řeky Berounky

Výše uvedené poznatky o Českém krasu by byly nekompletní bez uvedení konkrétních příkladů krasových jevů, se kterými se lze v oblasti setkat. I když je každá jeskynní prostora unikátní, popis několika různých typů těchto dutin může dát alespoň rámcovou představu, s čím mohou být konfrontovány projekty, realizované v tomto prostředí.

#### 2.3.4.1 Amerika I a II

Jeskyně leží v západním těžebním pásmu lomů Amerika, v opuštěném lomu Kamensko, přibližně 1,5 km jižně od obce Bubovice a 3 km západně od obce Mořina. Amerika I dosahuje délky 120 m, denivelace 26 m a její vchod se nachází ve výšce 400 m.n.m. Je rozdělena do dvou výškových pater; ve vyšším patře se nachází její hlavní prostora, Korytový dóm o velikosti  $26 \times 13 \times 8 \text{ m}$ . (KOLČAVA, 2004) Z něj dochází již delší doby k vyklízení jílovopísčitých sedimentů do níže položených prostor jeskyně. (CÍLEK, 1992, KUKLA, 1949) Jeskyně Amerika II má obdobnou stavbu jako Amerika I; vchod se nalézá ve výšce 400 m.n.m, celková délka jeskyně je 138 m s denivelací 24 m. Je opět tvořena dvěma patry oddělenými 11 m vysokou šachtovitou propastí; rozsáhlejší spodní patro je tvořeno kuželovým dómem velkým  $6 \times 8 \text{ m}$ , na který navazuje 15 m vysoký komín. V minulosti zde zřejmě rovněž docházelo k vyklízení sedimentů do hlubších partií jeskyně. (KOLČAVA, 2004)

Obě jeskyně byly otevřeny během těžby v lomu Kamensko; vznikly pravděpodobně současně ve vápencích stupně prag a pravděpodobně tvoří propojený systém, oddělený sedimentárními výplněmi. (TUENOVEC, 1964) Jeskyně ukazují příklad v oblasti nepříliš běžného horizontálního zkrasování. (LYSENKO, 1978)

#### 2.3.4.2 Arnoldka, Čerínka

Obě jeskyně se nachází v dnes stále činném lomu Čerínka, 600 m JJV od kapličky v obci Bubovice. Arnoldka je čtvrtou nejdelší jeskyní Českého krasu, celkový součet všech prostor činí 1360 m, a druhou nejhlubší jeskyní, s denivelací 111 m. (ŽÁK, ŽIVOR, 2011) Je otevřena dvěma vchody, původní se nachází v nejspodnější etáži lomu a dnes je až na malý otvor pro netopýry zabetonován (KOLČAVA, 2004), horní byl vytvořen rozšířením a vyčištěním krasového komínu na povrch (LYSENKO, 1978) a leží v úrovni 401 m.n.m. (KOLČAVA, 2004) Je vyvinuta v loděnických a sliveneckých vápencích stupně prag o sklonu  $30\text{--}40^\circ$ . (BRUTHANS, FILIPPI, 1999) Hlavní jeskynní prostory sledují tuto vrstevnatost (Hlavní, Panoptikální tah, Příbův dóm, Mezižebříková chodba), kromě vyšší části, tzv. Bludiště, která se vyvinula později než ukloněné chodby. To je tvořeno soustavou úzkých chodbiček bez zjevného vztahu k vrstevnatosti, o výškovém rozpětí 30 m a délce 500 m. (KOLČAVA, 2004). Výplň tvoří převážně červené jílovité sedimenty; předpokládá se, že v minulosti vyplňovaly značnou část prostoru jeskyně, od počátku kvartéru však dochází k jejich vyklízení do níže položených částí jeskyně. (BRUTHANS, FILIPPI, 1999) Dno, ležící o 71 m níže než hladina 135 m vzdáleného Bubovického potoka odvodňujícího tuto oblast, zaplavuje občasně jezírko (HROMAS, KUČERA 1973); sledováním kolísání jeho hladiny se podrobněji zabýval Kolčava (2013) a je rozvedeno v další kapitole.



Propast Čerinka je velice podobná Arnoldce; její vchod se opět nachází ve výšce 400 m.n.m., celková délka se rovná 630 m a denivelace 87 m. (KOLČAVA, 2004) Vyvinula se především v koněpruských a sliveneckých vápencích stupně prag, menší část chodeb je i v loděnických vápencích. Jeskynní prostory sledují zejména sklon vápenců okolo 45°. (HROMAS, KUČERA 1970) Dno propasti rovněž zaplavuje občasné jezírko, jeho hladina bývá ale vyšší než hladina v Arnoldce, což je způsobeno napájením skapovou vodou, které v Arnoldce téměř chybí. (KOLČAVA, 2013)

#### **2.3.4.3 Únorová propast**

Únorová propast je souborem 2-3 vertikálních šachet a puklin, jejichž celková délka tvoří 268 m při denivelaci 67m. (KOLČAVA, 2004) Vchod se nachází ve výšce 351 m.n.m., 221 m od ústí Gotické štolý v Trestaneckém lomu (též Mexiko, Shniloušák), 2 km ZJZ od obce Mořina. Tři výšková patra se rozpínají v rozmezí 375-310 m.n.m a jsou vytvořena zejména v kotýských vápencích; propojuje je největší vertikální prostora v oblasti Amerik, tzv. Hlavní šachta o profilu 4 x 1,5 m a celkové výšce 55 m. (HAVLÍČEK, URBAN, 1984) Dno je zatopeno, hloubka jezírka dosahuje až 16 m, (ZAPLETAL, 1985) přičemž přibližně prvních 7 m tvoří dómovitá prostora velikosti 25 x 15 m. Tím je vytvořen velice významný podpovrchový rezervoár podzemní vody, dotovaný z přítokové pukliny o vydatnosti až 12 l.s<sup>-1</sup>.

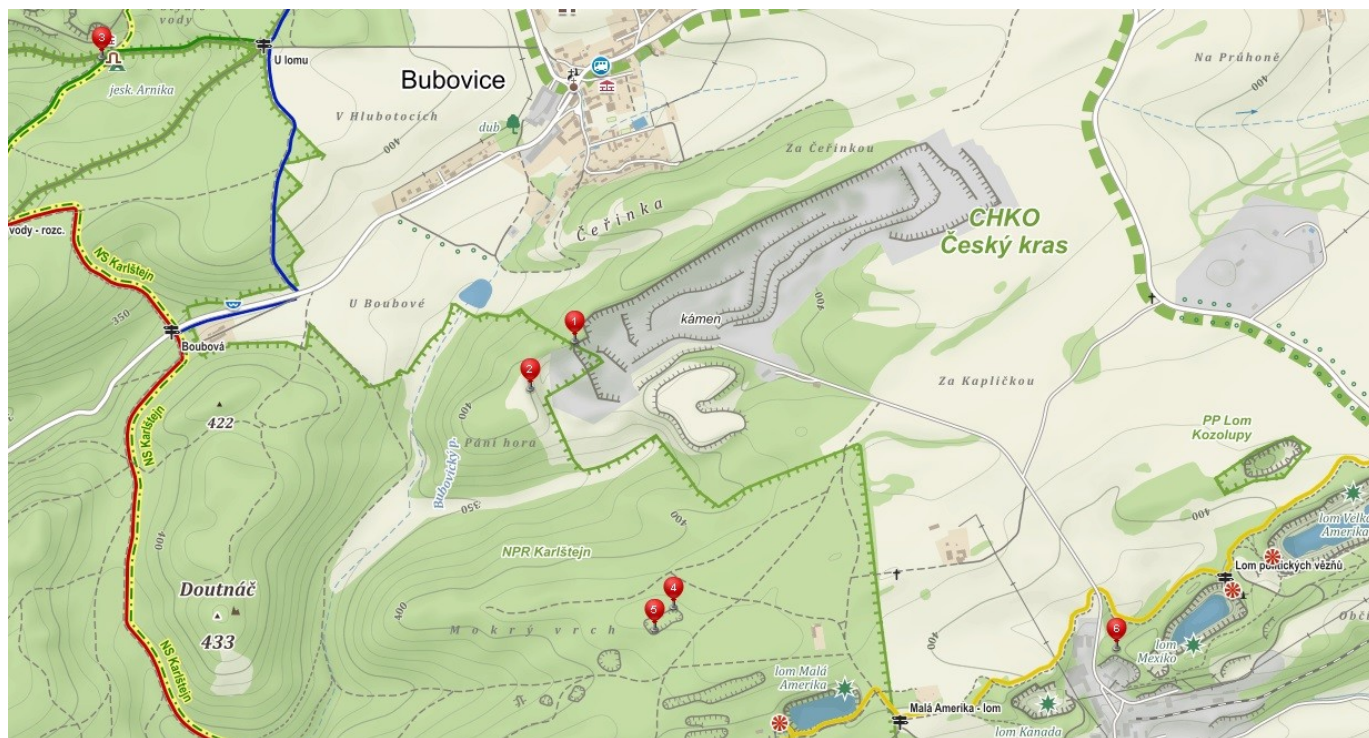
#### **2.3.4.4 Arnika**

Nachází se v horní části údolí Propadlé vody v místě křížení se zelenou turistickou značkou, 1,3 km západně od obce Bubovice. Jeskynní prostory zde upadají po zlíčovských vápencích a zatím dosahují délky 194 m při denivelaci 36 m. (ČSS ZO 1-05 Geospeleos, 2015) Jeskyně je zajímavá především občasným soustředěným ponorem a propojením s 1050 m vzdálenými, o 127 m níže ležícími vývěry ve Sv. Janem pod Skalou. Stopovací zkouška provedená zde mezi 14. a 16. červnem 1996 stanovila rozsah podzemních prostor vyplněných vodou mezi 1680 a 2530 m<sup>3</sup>. (ŽÁK et al., 1996) Opakování této zkoušky 29.3.1998 však nepotvrdilo prve získané údaje – stopovač ve vývěrech nebyl zaznamenán. (KOLČAVA, 2001)

#### **2.3.4.6 Deprese na Dívčích hradech**

Tento útvar je zde popsán pro lepší představu o hlubokých krasových depresích vyplněných křídovými sedimenty, obdobných depresi zastižené vrtem J-2 (GeoTec GS, 2007) a potenciálně ohrožujících stabilitu stavby. Profil sedimentů ve 119 m hlubokém vrtu tvoří zejména autochtonní perucké souvrství; podložní vápence v této „geologické trubce“, vzniklé zřejmě rozšiřováním vertikální pukliny však nebyly zasaženy ani v nejhlubší části vrtu, tj. výškové úrovni 195 m.n.m. (KLEIN, ZELENKA, 1991)

Objekty 2.3.4.1 – 2.3.4.4 jsou schematicky znázorněny v následující mapě.



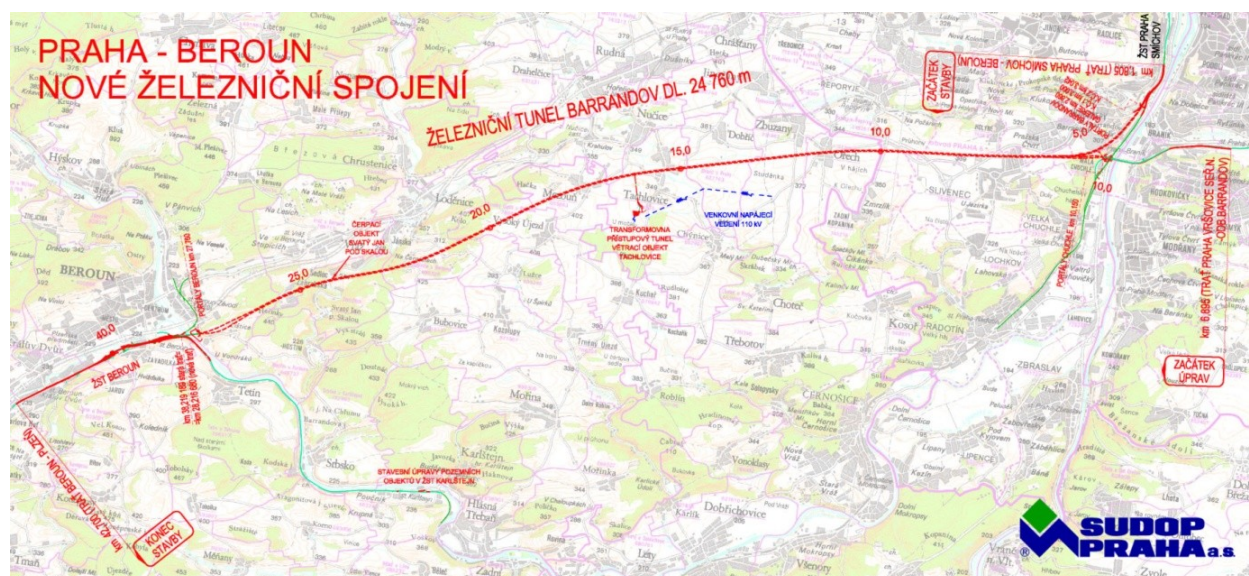
Obr.3: Přehled vchodů do popisovaných jeskyní. 1 – Arnoldka, 2 – Čeřinka, 3 – Arnika, 4 – Amerika I, 5– Amerika II, 6 – Únorová propast Podle (Mapy.cz, 2016)

### 3. Současný stav projektové přípravy

#### 3.1 Trasa trati

Poslední z variant trati je tzv. fialová varianta, na jejímž základě byla připravena geologicko-technická zpráva od firmy GeoTec (GeoTec GS, 2007). Její hlavní vlastností oproti dříve uvažovaným verzím je snaha v co největší míře eliminovat průchod krasem. Mocnost nadloží se pohybuje od 50 m (km 27,25) do 180 m (km 22,55), menší mocnost nadloží je v příportálových částech a v místě podchodu trati pod říčkou Loděnicí (30 m). (Staničení je vedeno od stanice Praha – Smíchov). Do podzemí trať vstupuje dvěma portály na km 3,0 a 3,042, v místě odbočení ulice K Barrandovu, přibližně na úrovni zámečku Slovanka. Trať se poté stáčí k Z, prochází pod filmovými ateliéry Barrandov, za nimiž se přibližně v km 5,5-5,75 napojuje odbočka na Prahu-Krč. Ta vede od portálu na konci Bránického mostu a pokračuje přímo (směrem k Z) až k místu napojení na hlavní trať ze Smíchova.

Trať se poté obloukovitě ohýbá směrem k S, prochází pod S hranicí městské části Slivenec, středem obce Ořech (pod MŠ a ZŠ), pod obcí Tachlovice (Jakubská náves), odkud dále pokračuje pod golfové hřiště u Vysokého Újezda a PP Špičatý vrch k úseku s nejnižším nadložím, podchodu Loděnice v Sv. Janu pod Skalou – Sedlci, odkud vede k berounskému portálu (km 27,7) přibližně umístěného pod zatáčkou silnice z Berouna do Hostimi, v úseku mezi železničním mostem v Závodí a ČOV. Odtud trať přechází mostem řeku Berounku a na druhém břehu vede paralelně se stávající tratí do stanice Beroun. (GeoTec GS, 2007)



Obr.4: Aktuální trasa tunelu (Podle Informace o stavbě, 2008)

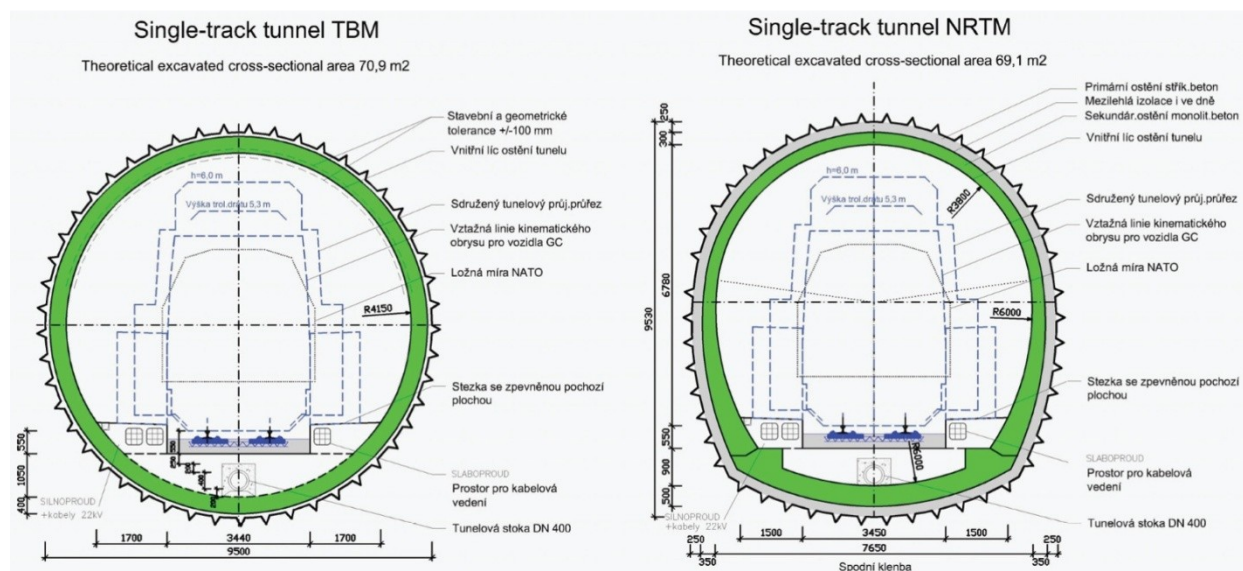
#### 3.2 Stavební koncepce trati

Podle technické zprávy z června 2007 (aktualizováno naposledy v červenci 2009) (KRSEK, 2007a) provedené firmou Metroprojekt Praha, a.s. je podzemní část stavby zamýšlená jako dva jednokolejné tunely o délce 24,7 km a poloměrem ostění 4,15 m, v příčné vzdálenosti 30 m s propojkami každých 400 m. Vzhledem k návrhové rychlosti 300 km/h jsou křížení v tunelu (napojující se trať do Prahy – Krče) mimoúrovňová. Přístup do tunelu je kromě portálů možný přístupovými tunely Chuchle (km 4,95 a 4,975), Tachlovice (km 16,15) a Sv. Jan (km 24,16 a 24,14). Vzhledem k délce tunelu se uvažuje nasazení TBM; jelikož by ražba probíhala v relativně měkkých horninách s nebezpečím průchodu krasem a pod obydlenými územími, počítá se s nasazením typu bez přítlačných desek do boku a s možností zajištění čelby tlakem rozpojené horniny – EPB. Výstroj tunelu by měly tvořit prefabrikované železobetonové dílce. Uvažuje se o nasazení TBM od napojení



odbočky na Prahu-Krč do portálu v Berouně, popř. po celé délce tunelu (tj. od portálu v Hlubočepích).

Další uplatněnou metodou je podle předběžného projektu NRTM. Její použití se uvažuje při ražbě rozpletu a odbočky směrem na Krč, přístupové tunely (Chuchle, Tachlovice, Sv. Jan), technologické prostory a v případě nasazení TBM až v místě rozpletu i úsek mezi Hlubočepy a rozpletem a případnou montážní komorou pro TBM. Uvažovaný způsob vystrojení je standartní (vnější ostění ze stříkaného betonu, izolace, sekundární monolitické ostění). Ražba tunelových trub se uvažuje dovrchní.



Obr.5: Řez tunelem raženým pomocí TBM (vlevo) a NRTM (vpravo). Podle (KRÁSA et al., 2007)

## 4. Možné metody ražby

### 4.1 Nová rakouská tunelovací metoda

Nová rakouská tunelovací metoda (dále jen NRTM) je nejpoužívanější konvenční (tj. mimo plnoprofilové razící stroje) tunelářskou metodou v ČR. Podle řady autorů se „nejedná o metodu jako takovou, ale spíše o způsob myšlení nad problematikou podzemního stavitelství.“ (LAUFFER, 2010, KARAKUS, FOWELL, 2004, BROWN, 1981) Jejím nejzákladnějším principem je maximální využití nosných vlastností horniny (SOUKUP, 2006, LAUFFER, 2010). Klíčovými prvky je zajištění stability výrubu primárním ostěním (zpravidla stříkaným betonem) co nejrychleji po jeho provedení, následné sledování deformací primárního ostění a po dosažení napětově-deformační rovnováhy aplikace sekundárního, definitivního ostění. Vývoj NRTM byl pozvolný, významnými kroky vřel bylo vyvinutí účinných strojů na aplikaci stříkaného betonu po druhé světové válce a představení modelu horninové klenby, jejímž autorem byl prof. Rabcewicz (který poté v roce 1962 poprvé užil termínu NRTM pro odlišení nově popsané metody). (LAUFFER, 2010) Principy metody ve 22 bodech shrnul Leopold Müller (KARAKUS, FOWELL, 2004, BROWN, 1981)

Postup NRTM spočívá v opakování základního cyklu – rozpojování horniny, její transport a zajištění výrubu nejprve primárním, poté sekundárním ostěním.

Rozpojování hornin probíhá dvěma základními způsoby. V tvrdých, skalních horninách (pevnost přibližně 50 MPa a více) se využívá trhacích prací; vrtací vozy (řízené manuálně nebo i polo- až plně automatizované) provedou řadu vrtů různého typu (zálomové pro střed čelby, obrysové na okrajích) podle vrtného schématu specifického pro daný projekt; ty jsou poté nabity trhavinou a odpáleny postupně od centrální části (zálomu) směrem k obrysovým vrtům, které mohou zůstat nenabité, případně nabité jen ob jeden vrt, popř. být jinak upraveny za účelem snížení negativních dopadů na stěny výrubu a jeho přesného profilování. Po odpalu je pak nutné zajistit větrání čelby,

zajištěného vzduchovým potrubím – rozlišujeme 3 druhy: foukací (nejefektivnější), sací (nejméně efektivní) a kombinované. Určitým omezením metody je její dopad na okolní prostředí – hluk a otřesy mohou komplikovat nebo znemožňovat její použití v nočních hodinách a/nebo v hustě obydlených oblastech. (SOUKUP, 2006)

Vzhledem k posledně popsaným nevýhodám je šetrnější druhý způsob, mechanické rozpojování hornin, prováděné nejčastěji tunelbagry (pevnost do 30-40 MPa), případně frézami, tzv. roadheadery. Tyto metody jsou výhodné zejména přesným provedením výrubu, menším zatížením okolí horniny a tudíž menšími nadvýlomy a menší spotřebou stříkaného betonu, přímým nakládáním rubaniny roadheaderem/tunelbagem bez nutnosti zvláštního nakladače. Limitujícími faktorem je pak pevnost hornin, nevýhodou je i poměrně značný příkon strojů.

V obou výše popsaných metodách vzniká po rozpojení nutnost vyklizení rubaniny z čelby. Ta může být vyvezena rovnou na místo konečného uložení, nebo dočasně umístěna na mezideponii u portálu tunelu. V některých případech může být rubanina využita přímo na místě pro potřeby vlastní stavby. (SOUKUP, 2006)

V obou případech rozpojování může probíhat na nečleněné, častěji ale na členěné čelbě. Členění (jak vertikální, tak i horizontální) má význam jak geotechnologický (stabilita tunelu, snížení dopadu na povrch), tak i prováděcí (např. omezený dosah ramene bagru v tunelech většího profilu). (SOUKUP, 2006)

Zajištění výrubu probíhá nejprve primárním ostěním, zejména stříkaným betonem, doplněným v případě potřeby o ocelové sítě nebo rozptýlenou výztuž - drátkobeton. Ta může být doplněna další výztuží, například příhradovými oblouky, kotvami, svorníky, v případě nutnosti vysoké okamžité pevnosti i důlní TH výztuží (tzv. hajcmány); x extrémním případě lze použít i profil HEBREX, který již ale prakticky neodpovídá požadavku na pružnost ostění. Další, rozšířená opatření uvedena v kapitole o sanacích.

Definitivní ostění je aplikováno po ustálení deformací primárního ostění. To může být samo o sobě ponecháno jako definitivní v případě velmi příznivých IG podmínek. Obecně se ale nejčastěji uplatňuje ostění z monolitického betonu, podle konkrétního vztahu stavby k podzemní vodě buď deštníkové s drenážním systémem, popř. celoplošné (pokud je počva pod úrovní hladiny podzemní vody), a ve speciálních případech může být rovněž provedeno z vodotěsného betonu. (SOUKUP, 2006)



Obr.6: Aplikace trubkového deštníku v tunelu Lainzer. Podle (LAUFFER, 2010)



## 4.2 Plnoprofilové razící stroje (TBM)

Plnoprofilové razící stroje (zjednodušeně, ale nepřesně označované jako TBM – viz dále) jsou stále hojněji využívanou tunelářskou metodou. Jejich základním rysem je kontinuální rozpojování horniny v celém profilu, případně za téměř současného budování ostění – svorníky a stříkaný beton u otevřeného typu strojů, u štítových typů prefabrikované železobetonové (v poslední době i drátkobetonové) dílce, tzv. tubingy. Předchůdcem dnešních strojů byl nemechanizovaný štít, použitý při budování tunelu pod řekou Temží v Londýně mezi léty 1825-1843. Skutečný rozvoj plnoprofilových štítů však začal v 50. letech, kdy byl v roce 1957 použit stroj konstrukce Jamese R. Robinse, který jako první použil k zapření stroje přítlačné grippery po jeho stranách a rovněž jako první použil hlavu s volně otočnými, valivými diskovými dláty (oproti dříve používaným pevným dlátům). V Čechách byl první stavbou raženou pomocí mechanizovaného štítu přivaděč pitné vody pro Chomutov z vodní nádrže Písečnice, realizovaný pomocí německého stroje mezi léty 1970-1975. Stroj české provenience byl využit až na stavbu ostravského vodovodu z Kružberku a Slezské Harty mezi léty 1985 a 1992. Po dokončení projektu byl stroj opakovaně použit, celkově se jeho pomocí vyrazilo 46644 m tunelů. (Pracovní skupina pro mechanizované tunelování CzTA, 2014)

Tunelovací stroje lze dle uplatnění v horninovém prostředí zjednodušeně rozdělit na stroje do skalních hornin a stroje do měkkých, poloskalních hornin a zemin. Ražba ve skalních horninách probíhá buď otevřenými stroji vybavenými grippery, popř. stroji uzavřenými štítem. Stroje do měkkých hornin jsou vždy vybaveny štítem pro udržení stability tunelu před vybudováním ostění a nemají grippery (zapírají se o posední díl ostění); v příznivých podmínkách se používají stroje bez podepření čelby, případně s celoplošným podepřením čelby, tj. razící hlava nemá vzhled paprscitého kola jako u prvního zmíněného typu, ale je uzavřená, aby podpírala čelbu a znemožnila pronikání materiálu dovnitř do stroje. V podmínkách geologicky komplikovaných, kde hrozí řícení nestabilního materiálu nebo průval vod, se pak používají stroje s tlakově podepřenou čelbou – pneumatický (APB), zeminový (EPB) nebo bentonitový (SPB) štít. (Pracovní skupina pro mechanizované tunelování CzTA, 2014)

TUNELOVACÍ STROJE			
RAZÍCÍ STROJE (TBM)		ŠTÍTY (SM)	
<i>TBM bez štítu (pevné horniny)</i>	<i>TBM se štítem (střídavá pevnost hornin)</i>	<i>S postupným pobíráním v čelbě</i>	<i>S plnoprofilovým pobíráním v čelbě</i>
	jednoduchý štít	čelby bez pažení	čelby bez podepření
	dvojitý štít	částečně pažená čelba	mechanicky podepřená čelba
		podepření čelby stlačeným vzduchem	podepření čelby stlačeným vzduchem
		podepření čelby bentonitovou suspenzí	pneumatický štít (APB)
		podepření čelby zeminou	podepření čelby bentonitovou suspenzí
			bentonitový štít (SPB)
			podepření čelby lubrikovanou zeminou
			(EPB)

Tab. 1: Tzv. evropské rozdělení tunelovacích strojů. Podle (Pracovní skupina pro mechanizované tunelování CzTA, 2014)

Nejrozšířenějším z jmenovaných tří typů je zeminový štít – představuje 80-90% všech používaných štítů. (Pracovní skupina pro mechanizované tunelování CzTA, 2014) Čelbu udržuje tlakem rubaniny v tlakově izolovaném prostoru před řeznou hlavou. Nasazuje se do poloskalních hornin a soudržných zemin a může být používán jak v uzavřeném, tak i v otevřeném módu; (BÄPPER, 2016, Pracovní skupina pro mechanizované tunelování CzTA, 2014) Vyklízení rubaniny je zajištěno

šnekovým dopravníkem, odebírajícím materiál z protiklenby – ta proto musí být v každém případě vyplněna vyrubaným materiálem.

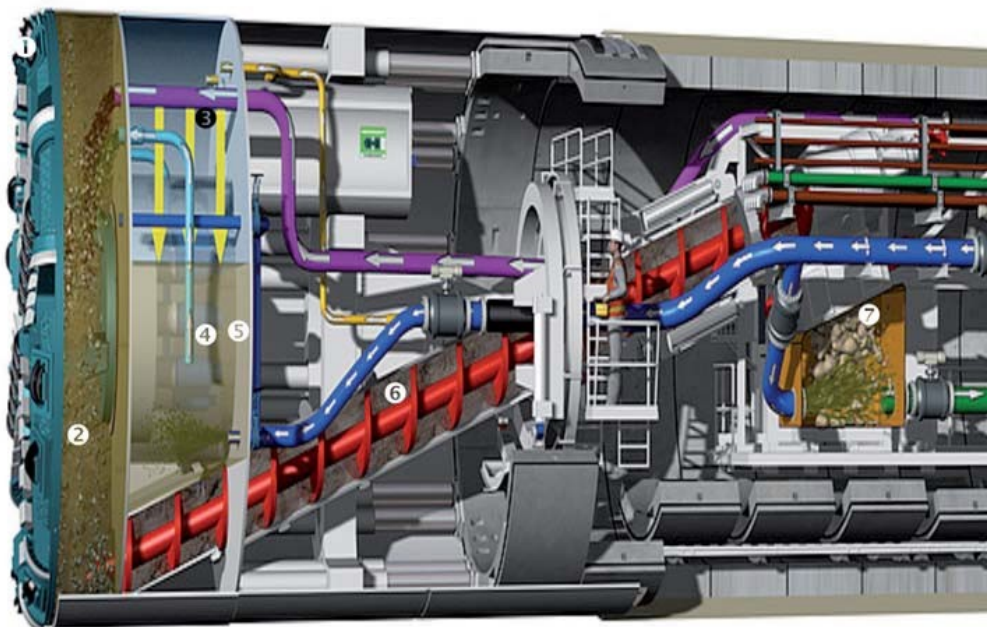
SPB funguje na obdobném principu jako EPB, hlavní rozdíl spočívá v materiálu využitém k podpoře čelby – zde se jedná o bentonitovou suspenzi, dodávanou do izolovaného prostoru čelby potrubím; obdobným potrubím je rubanina se suspenzí odebírána, tvoří tedy uzavřený okruh s úpravnou na povrchu, kde dochází k přečišťování a doplňování bentonitové směsi. Regulace tlaku je buď přímá pomocí čerpadla suspenze (slurry systém) nebo pomocí tlaku vzduchu na volnou hladinu suspenze zároveň s částečným přepažením izolovaného prostoru čelby (hydro systém).

APB, používaný v hrubozrnných zvodnělých zeminách, není vhodný pro daný projekt a je uveden pouze pro úplnost výčtu. Jak název napovídá, stabilizace čelby je dosaženo pomocí tlaku vzduchu.

Pro vypořádání se se stále náročnějšími podmínkami, kladenými na tunelovací stroje, dochází v poslední době ke kombinacím jejich jednotlivých typů. Běžná je kombinace otevřeného štítu do skalních hornin a EPB (Pracovní skupina pro mechanizované tunelování CzTA, 2014), popř. i STB (BÄPPER, 2016). V podmínkách studované trasy by ale použití štítu pro skalní horniny mělo jen malé opodstatnění – průměrná pevnost (vč. intruzivních basaltových partií) zde nepřesahuje 50 MPa. Zajímavé je použití tzv. Variable Density štítu popsané Bapplerovou (2016), v podstatě kombinace EPB a STB (s použitím trvalého odtěžování šnekovým dopravníkem), umožňující velmi přesnou kontrolu tlaku na čelbě, která byla použita v Kuala Lumpur a navržena vzhledem k místní geologii nikoliv nepodobné první třetině trasy tunelu Barrandien: střídaly se zde pískovce, prachovce a břidlice (Kenny Hill formation)(vhodné pro EPB) se silně zkrasovělými vápenci, s dutinami vyplněnými jemnozrnným materiálem (vhodné pro STB). Takový systém je ale velmi nákladný a nemusí se vyplatit, vezmeme-li v potaz poměrně malou délku krasového úseku, který navíc může být z větší části proražen pomocí NRTM. Na druhou stranu, problém rozvolněného materiálu a nutnosti podpory čelby se může vyskytovat i v okolí zlomů, kterých je v trase tunelu očekávané značné množství. (GeoTec GS, 2007)

Geotechnická veličina		Horniny		Zeminy			
		masiv stabilní až rozpukaný	masiv rozpukaný až drobný	soudržné a stabilní	soudržné a nestabilní	smíšené podmínky	nesoudržné
Tlaková pevnost horniny	[kN x m <sup>-2</sup> ]	50 až 300	50 až 5	1	0,1		
Tahová pevnost horniny	[kN x m <sup>-2</sup> ]	5 až 25	5 až 0,5				
Hodnota indexu RQD	[%]	50 až 100	50 až 10				
Vzdálenost diskontinuit	[m]	>0,6 až 2	0,06 až 0,6				
Soudržnost [kN x m <sup>-2</sup> ]	[kN x m <sup>-2</sup> ]			>30	5 až 30	5 až 30	
Rozložení zrnitosti	<0,02 [%]			30	30		10
	<0,06 [%]			>30	>30		
Otevřený TBM	nad HPV	vhodné	možné				
	pod HPV	vhodné	možné				
TBM se štítem	nad HPV	možné	vhodné				
	pod HPV	možné	(vhodné)				
Štít bez podpory čelby	nad HPV	možné	možné	vhodné			
	pod HPV	možné	(vhodné)				
Štít s mechanickou podporou čelby	nad HPV			možné	vhodné	vhodné	(možné)
	pod HPV						
Štít s podporou čelby stlačeným vzduchem	nad HPV						
	pod HPV				možné	vhodné	
Bentonitový štít	nad HPV	(možné)	možné				možné
	pod HPV					možné	vhodné
Zeminový štít	nad HPV						
	pod HPV			(možné)	vhodné	možné	(možné)

Tab.2: Doporučené tunelovací stroje dle geotechnických parametrů Podle (Pracovní skupina pro mechanizované tunelování CzTA, 2014)



Obr. 7: Variable Density štít. 1 – řezná hlava, 2 – odtěžovací komora, 3 – vzduchový polštář, 4 – tlaková vyrovnávací komora, 5 – tlaková dělicí přepážka, 6 – šnekový dopravník, 7 – rozplavovací jednotka. Podle (Pracovní skupina pro mechanizované tunelování CzTA, 2014)

#### 4.3 NRTM/TBM porovnání, vhodnost pro úsek Hlubočepy-rozplet

Pro projekt nového železničního spojení Praha-Beroun se uvažuje použití obou výše uvedených tunelovacích metod. (KRSEK, 2007a) Celková délka úseku Hlubočepy – Beroun kolem 25 km jednoznačně udává použití plnoprofilového tunelovacího stroje jako hlavní razící technologie – hlavní roli zde hraje výrazná automatizace procesu a proto nízké provozní náklady (po značné počáteční investici) (JODL, 2011, GÜTTER, 2011); obecně se uvádí, že použití TBM je ekonomicky výhodné (oproti NRTM) již při délce tunelu nad 3 km (JODL, 2011, GÜTTER, 2011, ZARE, 2016) (přesná hodnota ekonomicky výhodné délky tunelu závisí na konkrétní geologii a zemi, v níž se bude zakázka realizovat, a může značně kolísat), nicméně nasazení NRTM je rovněž uvažováno kromě některých dodatečných objektů (viz výše v textu) i v rámci hlavního úseku mezi Smíchovem a Berounem.

Nejednoznačná je volba tunelovací metody na úseku mezi portálem Hlubočepy a napojením odbočky na Krč (tj. staničení 3,0 – 5,5 km). Předběžný projekt zde doporučuje využití NRTM, přičemž připouští i uplatnění TBM. (KRSEK, 2007a) Každá z těchto metod má své přednosti a zápory, které budou rozebrány na následujících řádcích.

Portál Hlubočepy, od kterého bude ražba započata (KRSEK, 2007a), se nachází v poměrně hustě zastavěné oblasti vymezené Vltavou a Strakonickou ulicí (blízko odbočky na Barrandovský most) na jedné straně a ulicí k Barrandovu na straně druhé. Tunel pak bude procházet národní přírodní rezervací Barrandova skála, na jejímž vrcholu navíc stojí vilová zástavba a památkově chráněné Terasy Barrandov. (HÝŘ, 2016, Barrandov – areál nostalgických vzpomínek, 2014) Volba tunelovací metody tedy bude velmi výrazně záviset na dopadech na okolní prostředí.

Z hlediska negativních dopadů na nadložní horninu (a tedy i stabilitu staveb postavených na povrchu) se jako lepší metoda jeví plnoprofilové štíty – zamezují poklesům na povrchu a nenarušují okolní horninu účinkem trhavin. (JODL, 2011, Pracovní skupina pro mechanizované tunelování CzTA, 2014) I přes předběžná geotechnická data (GeoTec GS, 2007), nasvědčující možnosti použití tunelbagrů a roadheaderů spíše než trhačích prací, není jejich využití vyloučeno, což kromě problémů stability povrchu znamená i značnou disturbanci obyvatel blízkého okolí a možného omezení prací jen na určitou denní dobu. (SOUKUP, 2006) Štít rovněž zajišťuje vyšší bezpečnost při velkém zvodnění (Pracovní skupina pro mechanizované tunelování CzTA, 2014), které lze v horninách hlavního kolektoru očekávat.

Na druhou stranu vyžaduje TBM značný manipulační prostor pro sestavení štítu (GÜTTER, 2011), kterého vzhledem k umístění portálu Hlubočepy není mnoho – z tohoto hlediska může být výhodnější řešení navrhované předběžným projektem, s vybudováním montážní komory v místě rozpletu s odbočkou na Krč.

Dalším významným kritériem je čas, potřebný na zbudování díla. I když je štít svým postupem výrazně rychlejší než NRTM (v obdobných horninách) (JODL, 2011, GÜTTER, 2011, HOME, 2016), tento rychlý postup je vykoupen dlouhou dodací lhůtou stroje, která běžně dosahuje jednoho roku, často i více. (JODL, 2011, GÜTTER, 2011) Nabízí se proto využití NRTM v období mezi objednáním a dodáním štítu. Tato možnost si ovšem žádá přesnou ekonomickou analýzu poměru nákladů ušetřených urychlením stavby oproti nákladům vynaloženým na uplatnění NRTM, která je výrazně nad rámec této práce.

V neposlední řadě je nutné zmínit i bezpečnost práce – provoz štítu je v porovnání s NRTM mnohem „čistší“ (není zde prach a zplodiny z odstřelů), vyžaduje méně fyzické práce, pracovníci jsou zde chráněni konstrukcí štítu a nedochází zde k hornickým úrazům. (JODL, 2011, GÜTTER, 2011)

Zvládání geotechnologických rizik je v krasových oblastech klíčovým kritériem tunelového stavitelství a v této práci ji bude věnovaná samostatná kapitola. Na tomto místě je potřeba uvést, že je dnes na velmi dobré úrovni jak při použití štítu, tak při použití NRTM, proto není limitujícím faktorem jedné nebo druhé metody.

Výše uvedený výčet některých z aspektů dvou uvažovaných metod nedává jednoznačnou převahu jedné metody nad druhou; konečná volba bude tedy záviset zřejmě na zevrubném ekonomickém posouzení obou zmíněných (a popř. dalších) variant. Složitost výběru technologie při jednoznačně rizikových poměrech v lokalitě je motivací pro provedení optimalizační analýzy v rámci diplomové práce.

## 5. Vymezení rizik, průzkum a sanace

### 5.1 Vymezení rizik

Český kras představuje geologicky a hydrogeologicky velmi složité a těžko predikovatelné prostředí. Přesto však lze možná rizika rozlišit do několika kategorií a alespoň orientačně kvantifikovat.

Prvním velkým nebezpečím tunelování v krasu je silné zvodnění karbonátových hornin. Tunel (včetně úseků v krasu) přitom prochází z větší části pod hladinou podzemní vody. Její výška je proměnlivá v čase a závislá na řadě faktorů (zejména na klimatických podmínkách a jejich výkyvech); jako vypovídající údaj o hladině v hlavním kolektoru je uváděna hladina jezírka na dně jeskyně Arnoldka. (GeoTec GS, 2007) Její nejnižší bod se nachází v nadmořské výšce 289,9 m.n.m. a hladina je ve sledovaném období (první záznam 1972, souvisle od 1992) přítomna v 60% měření, přičemž nad úrovní 299 m.n.m. je v 50% případů. Historického maxima pak dosáhla po abnormálních srážkách 15. června 2013 s hodnotou 327,9 m.n.m. (KOLČAVA, 2013) Nivelita tunelových trub přitom na prvních deseti kilometrech trasy (kde je očekáván opakovaný průchod hlavním kolektorem) dosahuje maximální úrovně 248 m. n. m. Přitom je zastiženo celkem 5 úseků o souhrnné délce 3,11 km s očekávaným přítokem vyšším než 15 l·s<sup>-1</sup>. (GeoTec GS, 2007) Vzhledem k poměrně malému nadloží (do 130 m) se v Českém krasu naštěstí nesetkáme s extrémními tlaky (a přítoky) vysokého sloupce podzemní vody, popsány z tunelu Kurhrang v Iránu. (ZAREI et al., 2012)

Průvaly vod ve freatické zóně (tj. prakticky v blízkosti portálů) jsou možné jen ze zavěšených zvodní, případně dutin vyplněných zvodnělými sedimenty, které nepředstavují dlouhodobější přítok. Ty by se mohly (mimo hlavní kolektor) vyskytnout při naražení krasového kanálu ze soustředěného ponoru, které jsou v Českém krasu výjimečné; jedná se navíc o ponory občasných toků (např. systém Arnika – Sv. Jan pod Skalou) (BRUTHANS, ZEMAN, 2001).

Druhým významným rizikem tunelování v krasu je nebezpečí těsné blízkosti dutiny, popř. její přímé naražení nebo odpal a následný průval vod nebo sedimentů dutinu vyplňujících. Určitý přehled o množství a některých typech a morfologiích podává kapitola výše, zde je nutné dodat, že v krasové oblasti č. 30 (kde bude tunel procházet krasovým prostředím a jež se táhne od Hlubočep k Z – JZ, kde její hranici tvoří k SV vyhnutá linie Ořech - Lochkov) (CÍLEK et al., 1990) je prozatím známo 37 krasových jevů o celkové délce 432 m. Průměrná délka je 12,3 medián pak 6,0 m. (ŽÁK et al., 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015) Rozdíl v těchto hodnotách je způsoben zejména dvěma velkými jeskyněmi, odtěženou Svatoprokopskou s délkou 120 m a systémem nyní oddělených Klukovických jeskyní o délce 102 m (ŽÁK et al., 2003), vyvinutých ve zlíčovských vápencích (CHLUPÁČ, 1988) a dříve zřejmě tvořících jeden souvislý systém.

Zasažení krasové dutiny je všeobecně častým nebezpečím při tunelování v krasových oblastech. Vyplněné krasové dutiny přitom obecně představují vyšší nebezpečí než dutiny volné. (CASAGRANDE et al., 2005) Konkrétně v Českém krasu je pravděpodobnost zasažení krasové dutiny vyplněné (zvodnělými) sedimenty výrazně vyšší, než zastižení dutiny bez výplně. (BRUTHANS, ZEMAN, 2001) V případě náhlého průvalu by pak mohlo dojít k zavalení strojů; takový případ popisuje například (ZAREI et al., 2012), kdy propadem výplně krasové dutiny došlo k zaplavení tunelu a zavalení razicího stroje; ten pak musel být vyprošťován po dobu 50 dní. V daném případě však bylo použito nevhodného, otevřeného typu razicího stroje; proto je v Českém krasu nezbytné použití některého ze štítových typů strojů. Extrémním případem dutiny vyplněné sedimenty by mohly být krasové komíny zastižené vrty J-2 a vrtem na Dívčích hradech, popsané výše.

Krasové dutiny neohrožují tunelovou stavbu pouze z nadloží, ale i z podloží: při zastižení dutiny na úrovni počvy, popř. pod počvou při malé mocnosti horniny mezi dutinou a počvou, hrozí obdobná ztráta stability, v extrémním případě i propad těžebních strojů do dutiny. (PETKO, 2004) Jiným druhem nebezpečí, spojeným s rozpojováním hornin, je přítomnost krasové dutiny při použití trhacích prací. Ta může jednak snižovat efektivitu trhacích prací, způsobovat vyšší spotřebu trhavin a při nevědomém navrtání může vést k přebití vrtu, značně zvyšujícím jeho negativní



účinek na stabilitu výrubu a navíc vedoucím k zvýšení množství a dosahu úlomků, odlétajících z čelby a ohrožujících bezpečnost pracovníků na čelbě.(LUDWICZAK, 2004)

Velice komplexním nebezpečím je pak narušení stability horninové klenby krasovým jevem, vedoucí k celkové nestabilitě masivu a zvýšeným nákladům na sanaci dutin. Podrobněji se problematikou zabýval Rott (2008): provedl výpočet výšky horninové klenby podle různých analytických metod; s určitou mírou zjednodušení lze říci, že podle použitého modelu výpočtu se mocnost bezpečné klenby pohybuje v rozsahu 0,57 – 8,64 m. Takto velký rozptyl výsledků však nedává spolehlivý a jednoznačný způsob predikce možných nestabilit.

## 5.2 Možnosti průzkumu

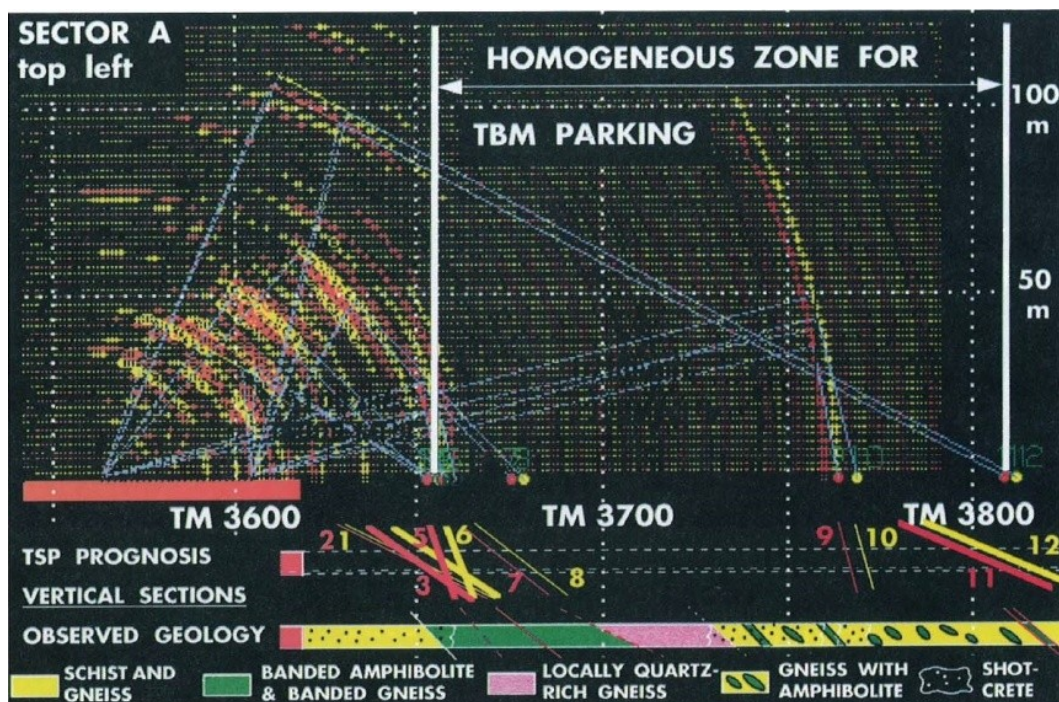
Průzkum je významnou etapou prací před zahájením průchodu přes problematické území. Lze s ním začít již před zahájením stavby studiem morfologie zájmové oblasti, analýzou a klasifikací rizikových objektů (dutin), výpočtem jejich hustoty na jednotku plochy a podobnou teoretickou přípravou. (CASAGRANDE et al., 2005) Vzhledem k velké heterogenitě krasového prostředí však přesné informace podá až průzkum z bezprostředního okolí během samotného tunelování. Pro tyto účely se jako velmi vhodné jeví použití průzkumné štoly (CASAGRANDE et al., 2005); nákladnost a pracnost však značně omezují využití takového průzkumného prostředku.

Velmi běžné a praktické je použití předvrtávání, a to jak při postupu pomocí NRTM, tak při tunelování plnoprofilovým štítem. V rámci uplatnění NRTM a použití trhavých prací se doporučuje sledování průniku vrtného soutyčí jako reakce na tvrdost materiálu, pro eliminaci odpalu v blízkosti dutiny a tím snížení jeho efektivity i převrtání na delší než potřebnou délku, s následným vyplněním přebytečné části vrtu. (LUDWICZAK, 2004) Aplikace v rámci tunelovacího štítu je obdobná, průnik, otáčky a jiné parametry vrtacího soutyčí jsou zde však sledovány a řízeny automaticky, navíc se vizuálně kontroluje výplach vrtu.(HEIM, 2016) Jistým omezením pro TBM je však riziko zlomení vrtné tyče a její následné kolize se řeznou hlavou. Proto se doporučuje využití spíše vějířovitých vrtů mimo čelbu. (Pracovní skupina pro mechanizované tunelování CzTA, 2014)

Z nedestruktivních metod jsou v posledních letech velice rozšířeny GPR (ground penetrating radar) a TSP (tunnel seismic prediction). GPR funguje na principu odrazu elektromagnetického vlnění na rozhraní hornin s různými elektromagnetickými vlastnostmi. Není tedy schopen odhalit rozhraní mezi horninami o různých mechanických vlastnostech, ale dobře odráží porozitu a obsah vody a především zlomy a dutiny. Dosah měření se může pohybovat kolem 30 m. Velikou výhodou je rychlost měření (HEIM, 2016, LI et al., 2015), při použití uvnitř vrtů pak možnost tomografického zobrazení prostředí (při použití více vrtů ke snímání). (HEIM, 2016)

TSP je opět použitelné v úpravě pro NRTM i TBM, jako zdroj seismického impulsu je použito buď pneumatických kladiv nebo malého množství trhavin. (DICKMANN, SANDER, 1996, HEIM, 2016, LI et al., 2015) 2 geofony se nachází na stěnách tunelu v určité vzdálenosti od čelby, v prostoru mezi senzorem a čelbou jsou v řadě umístěny odpalovací body. Metoda využívá lomu a odrazů seismických vln od rozhraní s různými mechanickými vlastnostmi (LI et al., 2015), její dosah je běžně 50-100 m, v obzvlášť dobrých případech i 150 m (DICKMANN, SANDER, 1996, HEIM, 2016); při snaze o větší dosah se razantně zvyšuje chybaměření (>10% (DICKMANN, SANDER, 1996)) Metoda kvalitně mapuje dutiny i zlomové zóny (HEIM, 2016), nevýhodou je špatná detekce od vertikály silně ukloněných až horizontálních rozhraní. (DICKMANN, SANDER, 1996)

Uvedené tři nejčastější metody mohou být doplněny o řadu dalších; kromě řady elektromagnetických metod se uplatňuje i mikrogravimetrie, založené na mikroanomáliích tíhového pole Země na základě rozdílné hustoty hornin. (CHALIKAKIS et al.,2011)



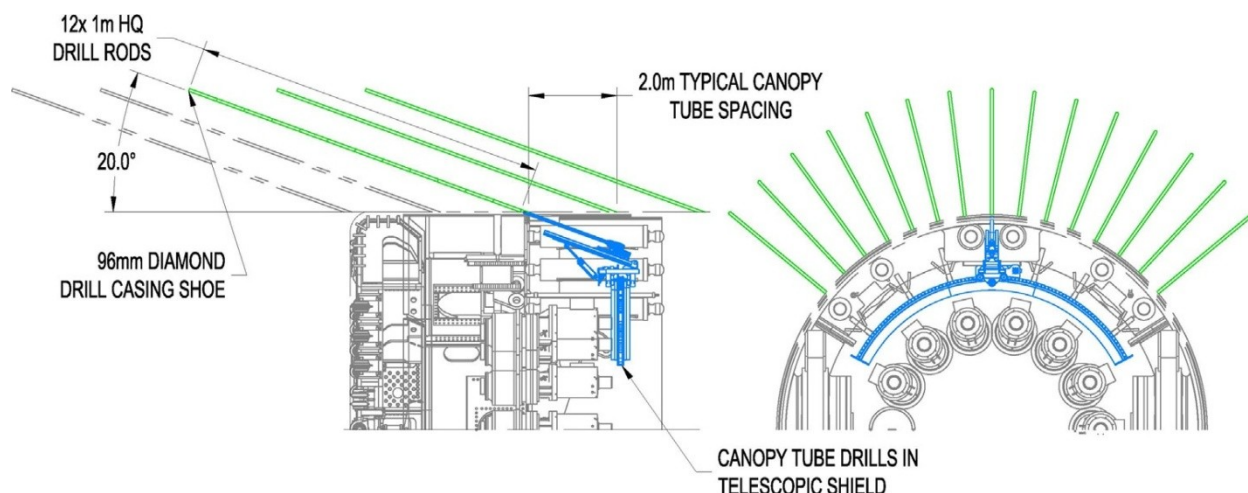
Obr.8: Obrazový výstup TSP (DICKMANN, SANDER, 1996)

### 5.3 Sanace

Sanace krasových jevů je v dnešní době na velmi dobré úrovni, ať už při využití štítu nebo NRTM. Při plnoprofilovém mechanickém tunelování hraje velmi významnou roli co nejdůkladnější analýza všech možných rizik; jejich vyhodnocení má vést k vybavení štítu potřebnými sanačními mechanismy, které by bylo jen velmi obtížné instalovat po uvedení stroje do provozu.

Zásadním sanačním prvkem štítu jsou vějířovité vrty, vytvářející „deštník“ sestávající buď z prostých jehel (ALIJA et al., 2013), nebo mikropilot (často s otvory pro průnik betonu do okolního materiálu) injektovanými (popř. tryskově injektovanými) stříkaným betonem, cementovou kaší, popř. pryskyřicí (HOME, 2016) (ALIJA et al., 2013, HEIM, 2016). Spíše provozním než sanačním opatřením je možnost přechodu štítu z otevřeného režimu do uzavřeného, s tlakovým podepřením čelby. Moderní stroje jej dokáží uskutečnit v rozsahu 3-5 minut (HOME, 2016) (2 minuty podle (BÄPPER, 2016)).

NRTM je charakteristická pestřejším širokým výběrem sanačních opatření. Dutiny se kromě vyplňování stříkaným betonem, popř. místním natěženým materiálem (PETKO, 2004) mohou obdobně jako u štítového tunelování sanovat jehlováním, mikropilotovými deštníky, injektážemi, popř. tryskovými injektážemi (ALIJA et al., 2013, GÖHRINGER, 2015). Tyto metody doplňuje o výztužné prvky jako svorníky, nosníky, popř. kotvy, aplikované jak z podzemí, tak i z povrchu (praktické zejména při nízkém nadloží, např. v příportálových úsecích) (CASAGRANDE et al., 2005). V případě dutiny v počvě se navrhuje její přemostění, na primárním ostění je vytvořena základová pláň, dutina je stabilizována stříkaným betonem (PETKO, 2004). Přitom je velmi důležité odhalit skutečné skalní dno, na němž se přemostění bude zakládat, a neumístit základovou pláň na mobilní sedimenty (GARAŠIĆ et al., 2010). Specifickým provozním opatřením v krasu je při použití trhacích prací úprava vrtného vzoru, spočívající ve zmenšení průměru a rozestupu vrtů. (LUDWICZAK, 2004)



Obr.9: Ukázka deštníkového vrtného systému dodatečně instalovaného na TBM po zaseknutí v rozvolněném materiálu. Převzato z (HOME, 2013)

## 5.4 Některá specifika tunelování v krasu

Kras se svým složitým geomorfologickým vývojem přináší mnoho pro jiná prostředí netypických aspektů; na některé z nich poukázaly výše uvedené kapitoly, některé další budou shrnuty v následujících odstavcích.

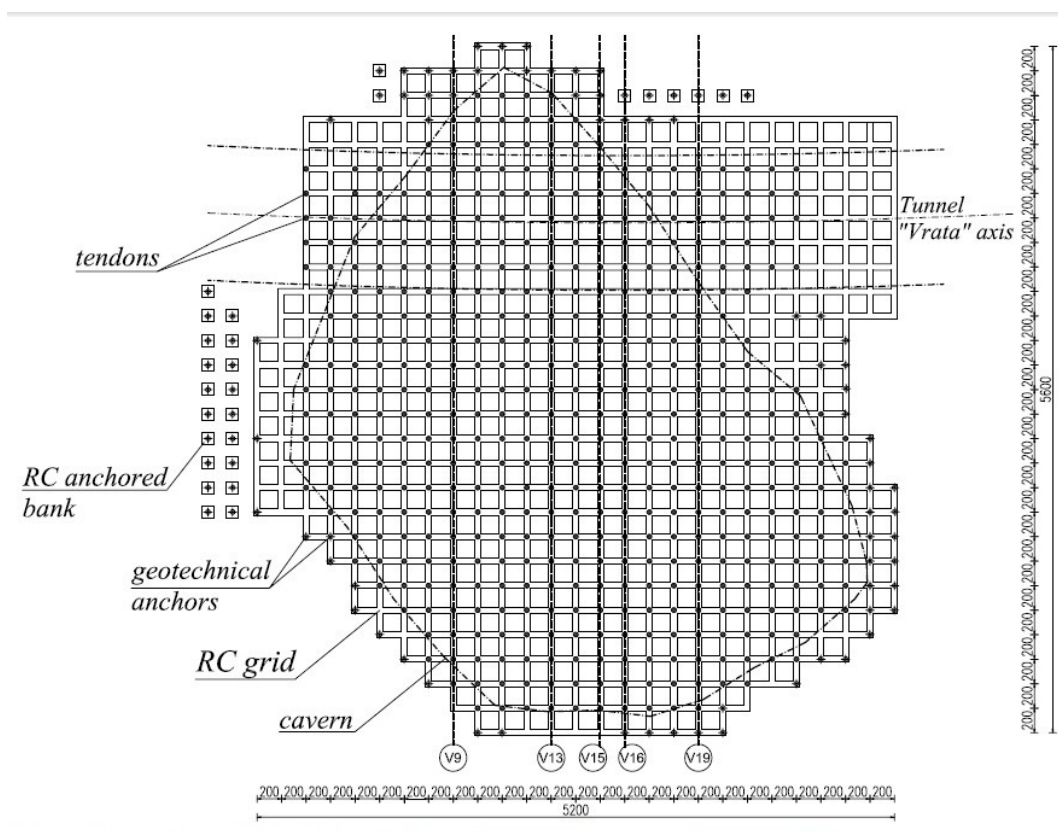
Nezákladnější vlastností krasu, kterou je vždy nutné mít na zřeteli, je jeho heterogenita a nepředvídatelnost. To v první řadě klade velmi vysoké nároky na průzkum; je nezbytné zdůraznit to, co již bylo zmíněno výše: je nutné velice důkladné terénní mapování, zaměřené na lokalizaci krasových jevů. Přitom je vhodné zdůraznit, že pro odhalení krasových dutin (vycházejících na povrch) je vhodnější zimní, zasněžené období, kdy dochází k vytvoření tzv. „mastného fleku“ – natavení sněhové pokrývky vlivem teplejšího vzduchu, vycházejícího z dutiny. Vzhledem k očekávanému rozsahu a hloubce nadloží však tento průzkum může mít význam jen v příportálových částech tunelu, a při postupu ve větších vzdálenostech od portálů budou mít klíčovou roli výše popsané průběžné geofyzikální metody průzkumu.

S otázkou rekognoskační souvisí i vyhodnocení rizik a volba odpovídající technologie. Alija et al. (2013) popisuje případ zhroucení horninové klenby při tunelování ve zkrasovělých horninách ve Španělsku; příčinou kolapsu byla nevhodně zvolená sanační opatření, navržená na základě nedostatečného průzkumu (jednou z příčin byla i špatná terénní prozkoumanost, způsobená přebujelou vegetací).

Obdobným případem byl tunel pro vodní elektrárnu Kargi Kizilirmak v Turecku, ražený pomocí TBM bez podpory čelby. Přestože se nejednalo o krasové prostředí, popisovaný problém je velmi blízký možným komplikacím v krasu. TBM, konstruované pro příznivější geologické podmínky než s jakými bylo konfrontováno, se zde dostalo do zóny velmi rozvolněných hornin (v blízkosti zlomu) (analogické s výplní krasové dutiny), které zavalily a znemožnily pohyb řezné hlavy. Tunelovací stroj pak musel být opakovaně vyprošťován pomocí tzv. bypass tunelů; rovněž bylo nutné jej dodatečně opatřit deštníkovým systémem vrtných zařízení, umožňujících s předstihem sanovat problematické úseky. (HOME, 2016). Podobný případ zavaleního TBM popisuje i Reza Zarei (2012).

Specifická jsou i některá stavební řešení používaná v krasu. Velmi typickým úkonem v rámci podzemního stavitelství v krasu je zaplňování menších kaveren stříkaným betonem, v případě jejich umístění na úrovni počvy i vytěženým materiálem z předchozích etap ražby (PETKO 2004). Kaverny nestandardních velikostí si ovšem mohou vyžádat nestandardní řešení. Zajímavým příkladem v tomto směru je zastižení větší jeskynní prostory tunelem v rámci dálnice Rijeka-Zagreb. Dutina o delší straně půdorysu 50 m zasahovala pod obě tunelové roury a plnila hydrogeologickou funkci; při jejím vyplnění zeminou nebo beton hrozilo narušení blízkých pramenů. Díky relativně nízkému nadloží (průměrně 30 m, maximálně 50 m) bylo možné dutinu zajistit z povrchu, pomocí železobetonové mřížové struktury s oky velikosti 2x2 m, šířkou stěn 0,5

m a výškou 1-1,5 m. V uzlech této masivní struktury byla upevněna lana s geotechnickými kotvami, jistící strop dutiny. Z povrchu byl navíc celek posílen řadou injektáží. Překonání dutiny pod úrovní počvy zajišťoval podle autorů nejdelší silniční most v jeskyni. Technologie stavby mostu bohužel nebyla rozebrána. (Garašič et al., 2010) Poznatky z konstrukčního řešení této stavby by mohly jistě najít uplatnění při zajišťování příportálových částí tunelu Praha-Beroun, zejména u portálů Chuchle a Hlubočepy.



Obr.10: Půdorys kotevní mříže nad Vratským tunelem. Převzato z (Garašič et al., 2010)

## 6. Závěr

Tato práce shrnula dosavadní poznatky o Českém krasu relevantní k plánované stavbě železničního tunelu mezi Prahou a Berounem. V hrubých rysech shrnula rizika spojená s tunelováním v krasu za použití dnes běžných technologií NRTM a plnoprofilového razicího štítu a krátce pojednala o možnostech průzkumu a sanace v rámci těchto metod.

Práce se zabývala geologií pražské pánve, přičemž litologickým popisem pokryla téměř zcela její vrstevní sled. Větší pozornosti se přitom dostalo souvrstvím svrchního siluru a spodního devonu, která podléhají krasovění; dutiny, vytvořené v těchto horninách, představují výrazné nebezpečí při tunelování v tomto prostředí. V práci se nachází stručný popis jejich vývoje s poukázáním na hlavní mechanismy jejich vzniku. Rovněž se práce dotýká otázky hydrogeologie, která jak se ukázalo je v úzkém spojení se vznikem krasových jevů.

Navazující kapitoly pak rozebírají technologické postupy a možnosti uplatnění jednotlivých tunelovacích metod, konkrétně NRTM nebo TBM. Jak se ukázalo, aplikace jedné konkrétní metody je v krasem ohroženém úseku nejednoznačná a s dosavadními poznatky nelze upřednostnit jednu metodu před druhou.

V závěrečné části jsou pak stručně nastíněna některá rizika a možnosti jejich predikce (zejména pomocí geofyzikálních metod). Zároveň jsou zde stručně shrnuta některá sanační opatření, využívaná v krasu, spolu s několika obecnými specifiky tunelování v daném prostředí.

Další rozpracování této poslední části, zejména analýza rizik spojených s krasovými jevy, bude předmětem navazující diplomové práce. Její konkrétní náplní se má stát vyhodnocení prostorového výskytu, rozsahu a morfologie krasových dutin, pravděpodobnost jejich výskytu v trase tunelu a míra rizika pro připravovanou stavbu.



## 7. Seznam použité literatury

### KNIHY

CHÁB, Jan et al, 2008. *Stručná geologie základu Českého masivu a jeho karbonského a permského pokryvu*. Praha: Vydavatelství České geologické služby. ISBN 978-80-7075-703-1.

CHLUPÁČ, Ivo, 1988. Geologické zajímavosti pražského okolí. Praha: Academia.

CHLUPÁČ, Ivo et al., 1992. *Paleozoikum Barrandienu*. Praha: Vydavatelství Českého geologického ústavu. ISBN 80-7075-055-3.

CHLUPÁČ, Ivo et al., 2002. *Geologická minulost české republiky*. Vydání 1. Praha: ACADEMIA. ISBN 80-200-0914-0.

ŽÁK, Karel, MAJER, Martin a CÍLEK, Václav, 2014. *Český kras – klíč k České krajině*. Skály, voda a čas. Praha: ACADEMIA. ISBN 978-80-200-2381-0.

### ČLÁNKY

ALIJA, S. et al., 2013. Geological engineering problems associated with tunnel construction in karst rock masses: The case of Gavarres tunnel (Spain). *Engineering Geology*. 157 (2013), 103–111, ISSN 0013-7952

BÄPPER, Karin, 2016. New developments in TBM tunnelling for changing grounds. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 57 (2016), 18–26. ISSN 0886-7798.

BOSÁK, Pavel, 1996. The evolution of karst and caves in Koněprusy region (Bohemian Karst, Czech Republic and paleohydrologic model. *Acta carsologica*. Ljubljana, 25 (1996), 57-67. ISSN 0583-6050

BROWN, E.T., 1981. Putting the NATM in perspective. *Tunnels & Tunneling*. 10/1981, 13-17 ISSN 1369-3999

BRUTHANS, Jiří, FILIPPI, Michal, 1999. Výzkum Arnoldky a dalších jeskyní lomu Čeřinka a otázky jejich vzniku a vývoje. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 25 (1999), 23-30. ISSN 1211-1643.

BRUTHANS, Jiří, ZEMAN, Ondřej, 2000. Nové poznatky o hydrogeologii Českého krasu. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 26 (2000), 41-49. ISSN 1211-1643.

BRUTHANS, Jiří, ZEMAN, Ondřej, 2001. Nové poznatky o charakteru a genezi podzemních krasových forem v Českém krasu a dalších oblastech bez soustředěných ponorů v České republice. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 27 (2001), 21-29. ISSN 1211-1643.

CASAGRANDE, G. et al., 2005. Hazard connected to railway tunnel construction in karstic area: applied geomorphological and hydrogeological surveys. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 5 (2005), 243–250. ISSN 1684-9981.

(CÍLEK, Václav, 1992). Členění Českého krasu. *Speleo*. Praha, ČSS, 2, 16-17. ISSN 1213-4724.

- CÍLEK, Václav, 1992. Propady v Českém krasu. *Speleo*. Praha, ČSS, 7, 47-48. ISSN 1213-4724.
- DICKMANN, Thomas, SANDER, Bernhard K., 1996. Driveage-Concurrent Tunnel Seismic Prediction (TSP) – Results from Vereina North Tunnel Mega-Project and Piora Pilot Gallery. *Felsbau*. 14/6 (1996). ISSN 1866-0134.
- GARAŠIĆ, Mladen et al., 2010. Investigation and remediation of the cavern in the Vrata tunel on the Zagreb – Rijeka highway (Croatia). *Acta carsologica*. Postojna, 39 (2010), 61-77. ISSN 0583-6050
- GÖHRINGER, Helmut, 2015. Göhringer: Zvládání krasových jevů na stavbě tunelu Baumleite raženého metodou NRTM v Durynsku. *Tunel*. 1 (2015), 13-22. ISSN 1211 – 0728.
- GÜTTER, Wolfgang et al., 2011. TBM versus NATM from the contractor's point of view. *Geomechanics and Tunnelling*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 4/4 (2011), 327-336. ISSN 1865-7389.
- HAVLÍČEK, David, URBAN, Jiří, 1984. Krasové jevy ve štolách severozápadní stěny Shniloušáku v Českém krasu. *Československý kras*. Praha, Academia, 34 (1984), 15-22. ISSN 0373-7179.
- HEIM, André, : Equipment for advance probing and for advance treatment of the ground from the TBM. *Geomechanics and Tunnelling*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 5/1 (2012), 57-65. ISSN 1865-7389.
- HOME, Lok, 2016. Hard rock TBM tunneling in challenging ground: Developments and lessons learned from the field. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 57 (2016) 27–32. ISSN 0886-7798.
- HROMAS, Jaroslav, KUČERA, Bohumil, 1970. Propast na Čeřince v Českém krasu. *Československý kras*. Praha, Academia, 22 (1970), 23-34. ISSN 0373-7179.
- HROMAS, Jaroslav, KUČERA, Bohumil, 1973. Zpráva o průzkumu nejhlubších propastí Čech v roce 1972. *Československý kras*. Praha, Academia, 25 (1973), 93. ISSN 0373-7179.
- CHALIKAKIS, Konstantinos et al., 2011. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal*. 19 (2011), 1169–1180. ISSN 1431-2174.
- JODL, Hans Georg, RESCH, Daniel, 2011. NATM and TBM – comparison with regard to construction operation. *Geomechanics and Tunnelling*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 4/4 (2011), 337-345. ISSN 1865-7389.
- KLEIN, Vladimír, ZELENKA, Přemysl, 1991. The cretaceous sediments filling vertical cavities in limestones of the Barrandian area. *Věstník ústředního ústavu geologického*. Praha: ČGÚ, 66/1, 51-59. ISSN 1210-3527.
- KOLČAVA, Michal, 2001: Arnika - druhé dějství. *Krasová deprese*, Praha, 9 (2001), 42-43
- KOLČAVA, Michal, 2004. Nový soupis krasových jevů skupiny 24 v Českém krasu. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 30 (2004), 4-44. ISSN 1211-1643.
- KOLČAVA, Michal, 2013. Sledování hladin podzemní vody v jeskyních na Paní hoře v Českém krasu a jejich abnormální stav v roce 2013. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 39 (2013), 13-24. ISSN 1211-1643.

- KRÁSA, D. et al., 2007: Prague – Beroun, new railway connection. In: *Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises*. London: Taylor & Francis Group, 111-116. ISBN 978-0-415-40807-3.
- KUKLA, Jiří, 1949. Nová jeskyně v Českém krasu. *Československý kras*. Brno, 2, 325-326. ISSN 0373-7179.
- LAUFFER, Harald, 2010. The development of the NATM – a historical review. *Geomechanics and Tunnelling*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 3/6 (2010), 763-772. ISSN 1865-7389.
- LI, S. C. et al., 2015. Comprehensive geophysical prediction and treatment measures of karst caves in deep buried tunnel. *Journal of Applied Geophysics*. 116 (2015), 247–257. ISSN 0926-9851.
- LUDWICZAK, James, 2004. That sinking feeling. *Pit & Quarry*. 10/2004, 24-26. ISSN 0032-0293.
- LYSENKO, Vladimír, 1978. Soupis jeskyní Českého krasu - oblast 24 (Ameriky, Mořina, Bubovice). *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 3 (1978), 57-74. ISSN 1211-1643.
- MENGLER, Zdeněk et al., 2011. Petzoldovy jeskyně – nový významný speleologický objekt v Českém krasu. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 2011 (37), 5-14. ISSN 1211-1643.
- PETKO, Antonín, 2004. Razenie tunela Kastelec v podmienkach Slovinského krasu. *Tunel*. 3 (2004), 38-42. ISSN 1211 – 0728.
- TURNOVEC, Ivan, 1964. Krasové jevy povodí Bubovického potoka v Českém krasu. *Československý kras*. Praha, Academia, 16 (1964), 7-15. ISSN 0373-7179.
- ZAPLETAL, Jeroným, 1985. Zpráva ze speleologického průzkumu v Únorové propasti. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 1985 (11), 77-78. ISSN 1211-1643.
- ZARE, S. et al., 2016. Evaluating D&B and TBM tunnelling using NTNU prediction models. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 59 (2016), 55–64. ISSN 0886-7798
- ZAREI, Hamid Reza et al., 2012. Identifying geological hazards related to tunneling in carbonate karstic rocks - Zagros, Iran. *Arab J Geosci*. 5 (2012), 457–464. ISSN 1866-7511.
- ŽÁK, Karel et al., 1996. Chování krasových pramenů ve Svatém Janu pod Skalou během mimořádných srážkových událostí v květnu a červnu 1995 a nový občasný ponor v údolí Propadlé vody. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 22 (1996), 41-47. ISSN 1211-1643.
- ŽÁK, Karel et al., 2003. Soupis jeskyní Českého krasu – stav k 1. říjnu 2003. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 29 (2003), 5-20. ISSN 1211-1643.
- ŽÁK, Karel et al., 2005. Soupis jeskyní Českého krasu – stav k 1. říjnu 2005. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 31 (2005), 19-21. ISSN 1211-1643.
- ŽÁK, Karel et al., 2007. Soupis jeskyní Českého krasu. Doplnky a změny za období 1.10.2005 až 1.10.2007. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 33 (2007), 28-30. ISSN 1211-1643.

- ŽÁK, Karel, KOLČAVA, Michal, ŽIVOR, Roman, 2009. Evidence jeskyní Českého krasu. Doplnky a změny za období 1.10.2007 až 1.10.2009. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 35 (2009), 50-54. ISSN 1211-1643.
- ŽÁK, Karel, ŽIVOR, Roman, 2011. Evidence jeskyní Českého krasu. Doplnky a změny za období 1.10.2009 až 1.10.2011. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 37 (2011), 60-64. ISSN 1211-1643.
- ŽÁK, Karel et al., 2013. Evidence jeskyní Českého krasu. Doplnky a změny za období 1.10.2011 až 30.9.2013. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 39 (2013), 63-67. ISSN 1211-1643.
- ŽÁK, Karel et al., 2015. Evidence jeskyní Českého krasu. Doplnky a změny za období 1. října 2013 až 30. září 2015 a novinky ve výzkumu jeskyní. *Český kras*. Beroun: Muzeum Českého krasu, 41 (2015), 53-57. ISSN 1211-1643.

## ZÁVĚREČNÉ ZPRÁVY

- GeoTec GS a.s., 2007. *Praha – Beroun, nové železniční spojení: Závěrečná zpráva o předběžném geotechnickém, geofyzikálním a geotechnologickém průzkumu*. Část A – tunely. Zakázka 2005-075, květen 2007. ČGS, Archiv Geofond, P117979.
- KRSEK, Miroslav, 2007a. *Praha - Beroun, nové železniční spojení, stavební část: Železniční tunely*. Metroprojekt Praha a.s., 06.2007. Identifikační číslo dokumentu: 07/4230/001/04/01/07. Poslední změna 11.2009.

## ONLINE ZDROJE

- BONEV, Jan, 2006. Rychlosti III.koridor. *K-REPORT* [online] BONEV, Jan. Poslední změna 15.08.2006. [Cit. 28.08.2016]. Dostupné z <http://www.k-report.net/koridory/rychlosti3k.htm>
- ČSS ZO 1-05 Geospeleos, 2015. Arnika, 2015. *Geospeleos ČSS ZO 1-05* [online]. ČSS ZO 1-05 Geospeleos. Poslední změna 19.2.2015. [Cit. 28.08.2016] Dostupné z: <http://www.geospeleos.com/Lokality/Arnika/Index.htm>
- HÝŘ, Marek, 2016. Dlouho očekávaná rekonstrukce se blíží. Barrandovské terasy se dočkaly. In: *iDNES.cz* [online]. 16.04.2016. [Cit. 28.08.2016]. Dostupné z: [http://praha.idnes.cz/rekonstrukce-barrandovskych-teras-d6f-/metro.aspx?c=A160414\\_203610\\_praha-metro\\_lupo](http://praha.idnes.cz/rekonstrukce-barrandovskych-teras-d6f-/metro.aspx?c=A160414_203610_praha-metro_lupo)
- Informace o stavbě, 2008. *Praha – Beroun, nové železniční spojení* [online]. CTECH s.r.o. Poslední změna 10.1.2008. [Cit. 28.08.2016]. Dostupné z <http://www.praha-beroun.cz/index.php?t=article&n=clanek-informace-o-stavbe-3>
- KRSEK, Miroslav, 2007b. Praha-Beroun, nové železniční spojení. In: *Konference „Železniční dopravní cesta 2007“* [online]. Zlín 27.-29.3.2007. [Cit. 28.08.2016] Dostupné z: [http://vrt.fd.cvut.cz/data/dokumenty/pha\\_beroun-prednaska.pdf](http://vrt.fd.cvut.cz/data/dokumenty/pha_beroun-prednaska.pdf)

- KRSEK, Miroslav, 2007c. Projekt VR-železničního tunelu mezi Prahou a Berounem. In: *Konference „Vysokorychlostní železniční doprava ve světě a v České republice“* [online]. Praha, 14.-15.11.2007. [Cit. 28.08.2016]. Dostupné z: <http://vrt.fd.cvut.cz/data/konference/36tcz.pdf>
- Mapy.cz, 2016. In: *Mapy.cz, 2016* [online] [Cit. 28.08.2016] Dostupné z: <http://www.mapy.cz>
- Pracovní skupina pro mechanizované tunelování CzTA, 2014. Uživatelská příručka pro mechanizované tunelování v podmínkách ČR. In: Edice „Dokumenty CzTA“. [online] 07.2014. [Cit. 28.08.2016] Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/edice\\_CTuK/czta\\_07\\_mechanizovane\\_tunelovani.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/edice_CTuK/czta_07_mechanizovane_tunelovani.pdf)
- Rhine-Danube Core Network Corridor, 2015. *Evropská komise* [online]. European Communities. Poslední změna 29.06.2015. [Cit. 28.08.2016]. Dostupné z: [http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/ten-t-guidelines/corridors/rhine-dan\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/ten-t-guidelines/corridors/rhine-dan_en.htm)
- RŮŽIČKA, Jiří, HASÍK, Otakar, 2007. Modernizace železniční tratě Praha – Beroun. In: *Konference „Železniční mosty a tunely“, ročník 12.* [online] 18.01.2007. [Cit. 28.08.2016] Dostupné z: [http://mo.ttnz.cz/wordpress/wp-content/uploads/dokumenty/Modernizace\\_zeleznicni\\_trate\\_Praha\\_-\\_Beroun.pdf](http://mo.ttnz.cz/wordpress/wp-content/uploads/dokumenty/Modernizace_zeleznicni_trate_Praha_-_Beroun.pdf)
- SOUKUP, Václav, 2006. Zásady a principy NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR. In: Edice „Dokumenty CzTA“. [online] 07.2014. [Cit. 28.08.2016] Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/edice\\_CTuK/ctuk\\_02.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/edice_CTuK/ctuk_02.pdf)
- Terasy Barrandov – areál nostalgických vzpomínek, 2014. *Praha neznámá: průvodce po pražských čtvrtích* [online]. DexuS. Poslední změna 20.07.2014. [Cit. 28.08.2016]. Dostupné z: <http://www.prahaneznamy.cz/praha-5/hlubocepy/terasy-barrandov-areal-nostalgickych-vzpominek/>
- Tranzitní železniční koridory, 2006. *Ministerstvo dopravy* [online]. Ministerstvo dopravy ČR. [Cit. 28.08.2016]. Dostupné z: [http://www.mdcz.cz/cs/Drazni\\_doprava/Rozvoj\\_zeleznicni\\_infrastruktury/Tranzitni%C3%AD+%C5%BEelezni%C4%8Dn%C3%AD+koridory.htm](http://www.mdcz.cz/cs/Drazni_doprava/Rozvoj_zeleznicni_infrastruktury/Tranzitni%C3%AD+%C5%BEelezni%C4%8Dn%C3%AD+koridory.htm)

## OSTATNÍ

- KARAKUS, M., FOWELL, R.J., 2004. An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM). In: *ROCKMEC'2004 - VIIth Regional Rock Mechanics Symposium*. Sivas, Türkiye. Příspěvek z konference.
- ROTT, Josef, 2008. *Stručný přehled některých analytických metod stanovení dosahu vlivu výrubu na okolní napjatost (pro podzemní díla s vysokým nadložením)*. Praha: Nepublikovaná technická zpráva.